



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Механико-
машиностроительный
институт**

**Е. Ю. РАСКАТОВ
В. А. СПИРИДОНОВ**

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

Учебное пособие



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

Е. Ю. Раскатов
В. А. Спиридонов

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по программам бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки
15.03.02, 15.04.02 «Технологические машины и оборудование»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 669(075.8)
ББК 34.3я73-1
Р242

Рецензенты:

Б. М. Г о т л и б, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Мехатроника»
Уральского государственного университета путей сообщения;

Б. Н. Г у з а н о в, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой материаловедения, технологии контроля
в машиностроении и методики профессионального обучения
Российского государственного профессионально-педагогического университета

Научный редактор

В. С. П а р ш и н, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Металлургические и роторные машины» УрФУ

Раскатов, Е. Ю.

Р242 Основы научных исследований и моделирования металлургических машин : [учеб. пособие] / Е. Ю. Раскатов, В. А. Спиридонов ; [науч. ред. В. С. Паршин] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 468 с.

ISBN 978-5-7996-1541-3

Учебное пособие посвящено основам научного поиска, методам, которые широко используются в экспериментальных исследованиях. Рассмотрены основные процессы научных исследований: выбор темы, информационный и научный поиск, внедрение. Показана техника факторного планирования эксперимента. Особое внимание уделено интерпретации результатов эксперимента и проверки правильности исходных предпосылок, приемам планирования в лабораторных и промышленных условиях.

Материал пособия может служить методическим и практическим руководством для выполнения научных работ студентами, обучающимися по программам бакалавриата и магистратуры, а также для аспирантов соответствующего профиля.

УДК 669(075.8)
ББК 34.3я73-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУКЕ	10
1.1. Основные понятия, роль науки в современных условиях	10
1.2. Классификация научных исследований	12
1.3. Аттестация научных работников	15
2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ НАУКИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	19
2.1. Сущность инженерной деятельности и ее зарождение	21
2.2. Появление знаний в области механики	50
2.3. Развитие механики как науки	68
2.4. Развитие инженерной деятельности	110
2.5. Становление отечественных инженерных наук	126
3. МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ	152
3.1. Особенности НИР и ОКР	152
3.2. Организационные принципы выполнения НИР	155
3.3. Основные этапы проведения НИР	157
3.4. Составление, оформление отчета о НИР или диссертационной работы	160
4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ЧАСТЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ	163
4.1. Моделирование	163
4.2. Формы моделирования, типы моделей	164
4.3. Кибернетическое представление модели	169
4.4. Геометрическое представление модели	171
4.5. Основные понятия теории подобия и размерностей	173
4.5.1. Характеристика входных и выходного параметров	173
4.5.2. Теорема о существенных параметрах	176
4.5.3. Размерные и безразмерные величины	179
4.5.4. Теорема подобия (π-теорема)	186

4.5.5. Примеры решения задач с применением π -теоремы	190
4.5.6. Правила проектирования моделей	199
4.5.7. Основы физического моделирования	205
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	211
5.1. Общие сведения	211
5.1.1. Цели эксперимента	216
5.1.2. Описание изучаемого процесса	216
5.1.3. Нахождение экстремальных условий процесса	216
5.1.4. Ранжирование переменных	217
5.1.5. Имитация реального процесса	218
5.1.6. Типы эксперимента	218
5.2. Модельные исследования	222
5.2.1. Датчики	223
5.2.2. Электротензометрия	226
5.2.3. Пьезодатчики. Пьезоизмерительная система	252
5.2.4. Измерение напряжений и усилий в деталях машин	267
5.3. Планирование эксперимента	307
5.3.1. Общие сведения	307
5.3.2. Планы первого порядка. Основные понятия и определения	308
5.3.3. Полный факторный эксперимент	317
5.3.4. Дробный факторный эксперимент	322
5.3.5. Свойства матриц полного и дробного факторных экспериментов	332
5.4. Эмпирические методы исследования	333
5.5. Ошибки измерений	336
5.5.1. Погрешности измерений и их причины	336
5.5.2. Погрешности, связанные с процессом измерения	337
5.5.3. Погрешности, связанные с обработкой измеренных величин	341
5.5.4. Погрешности измерительных устройств	343
5.5.5. Статические погрешности измерений. Виды погрешностей	345
5.5.6. Случайная погрешность отдельного измерения	346
5.5.7. Случайная погрешность среднего значения	350

5.5.8. Систематическая погрешность	351
5.5.9. Распространение погрешностей	353
5.5.10. Грубые погрешности измерения и их отсеивание	356
6. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ	357
6.1. Общие принципы математической статистики	358
6.2. Оценка выборок	360
6.3. Проведение эксперимента и обработка его результатов	361
6.4. Крутое восхождение по поверхности отклика	379
6.5. Проверка гипотезы нормальности распределения	387
6.6. Различие средних значений	389
6.7. Линейная регрессия	391
6.8. Линейная корреляция	395
6.9. Автоматическая коррекция погрешности	399
7. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	402
7.1. Дифференциальные уравнения	403
7.2. Основные численные методы решения технических задач	410
8. ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ	421
8.1. Общие сведения об изобретательской деятельности и патентовании	421
8.2. Изобретательство как исследовательский процесс	423
8.3. Выбор аналогов технического объекта и его описание	427
8.4. Основы создания патентоспособного технического объекта	430
8.5. Обеспечение изобретательского уровня технической разработки	437
8.6. Патент на изобретение, полезную модель, промышленный образец	448
8.7. Система регистрации научных открытий	455
9. ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРАКТИКУ	458
Библиографические ссылки	466

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные наука и техника ставят перед высшей школой все более сложные задачи. Высшая техническая школа должна не только дать своим студентам инженерное образование в виде определенной суммы знаний и опыта, но и воспитать инженеров. Современные инженеры должны иметь широкую общенаучную подготовку и достаточную специализацию, обладать навыками самостоятельной работы и научных исследований, должны быть готовы дать научно-техническую, экономическую, политическую и даже психологическую оценку той или иной производственной ситуации. Для этого они должны постоянно находиться на уровне передовых достижений науки и техники, экономики и политики.

Подготовить такого инженера непросто, нужны усилия вуза и самого студента. Одним из эффективных направлений совершенствования подготовки инженеров является привлечение студентов к реальной научно-исследовательской работе. Такая работа должна воспитывать в студенте черты исследователя, способного самостоятельно ориентироваться в новых и неожиданных условиях, обогащать его навыками самостоятельного творчества. Важная роль в этом деле принадлежит учебной исследовательской работе студентов.

Всякое исследование в науке предпринимается для того, чтобы преодолеть определенные трудности в процессе познания новых явлений, объяснить ранее неизвестные факты или выявить неполноту старых способов объяснения известных фактов. Эти трудности в наиболее отчетливом виде выступают в так называемых проблемных ситуациях, когда существующее научное знание, его уровень и понятийный аппарат оказываются недостаточными для решения новых задач познания. Осознание противоречия между ограниченностью имеющегося научного знания и потребностями его дальнейшего развития и приводит к постановке новых научных проблем.

Научное исследование не только начинается с выдвижения проблемы, но и постоянно имеет дело с проблемами, так как решение одной из них приводит к возникновению других, которые, в свою очередь, порождают множество новых проблем. Разумеется, не все проблемы в науке являются одинаково важными и существенными. Уровень научного исследования в значительной мере определяется тем, насколько новыми и актуальными являются проблемы, над которыми работают ученые. Любая научная проблема тем и отличается от простого вопроса, что ответ на нее нельзя найти путем преобразования имеющейся информации. Решение проблемы всегда предполагает выход за пределы известного и поэтому не может быть найдено по каким-то заранее известным, готовым правилам и методам. Это не исключает возможности и целесообразности планирования исследования, а также использования некоторых вспомогательных, эвристических средств и методов для решения конкретных проблем науки.

Возникновение проблемы свидетельствует о недостаточности или даже об отсутствии необходимых знаний, методов и средств для решения новых задач, постоянно выдвигаемых в процессе практического и теоретического освоения мира. Как уже отмечалось, противоречие между достигнутым объемом и уровнем научного знания, необходимостью решения новых познавательных задач, углубления и расширения существующего знания и создает проблемную ситуацию.

Прежде чем взяться за решение проблемы, необходимо провести предварительное исследование, в процессе которого будет точно сформулирована сама проблема и указаны примерные пути и методы ее решения. Такая разработка проблемы может осуществляться по следующим основным направлениям:

1. Обсуждение новых фактов и явлений, которые не могут быть объяснены в рамках существующих теорий. Предварительный анализ должен раскрыть характер и объем новой информации. В опытных науках такой анализ связан в первую очередь с обсуждением новых экспериментальных результатов и данных систематических наблюдений. Насколько многочисленны полученные данные?

Как сильно противоречат они имеющейся теории? Существует ли принципиальная возможность приспособления и модификации известных теорий к этим данным? История науки показывает, что старые теории не сразу отвергались, если обнаруживались противоречащие им факты: эти теории старались модифицировать таким образом, чтобы они смогли объяснить и новые факты. И только безуспешность таких попыток, увеличение числа фактов, противоречащих старой теории, вынуждали ученых создавать новые теории.

2. Предварительный анализ и оценка тех идей и методов решения проблемы, которые могут быть выдвинуты исходя из учета новых фактов и существующих теоретических предпосылок. По сути дела, этот этап разработки проблемы естественно переходит в предварительную стадию выдвижения, обоснования и оценки тех гипотез, с помощью которых пытаются решить возникшую проблему. Однако на этой стадии не выдвигается задача конкретной разработки какой-либо отдельной гипотезы. Скорее всего, речь должна идти о сравнительной оценке различных гипотез, степени их эмпирической и теоретической обоснованности.

3. Определение типа решения проблемы, цели, которая преследуется решением, связи с другими проблемами, возможности контроля решения. Если проблема допускает решение, то часто возникает необходимость определить, какое решение следует предпочесть в конкретно сложившихся условиях исследования в той или иной отрасли науки. Как правило, исчерпывающее решение проблем в науке лимитируется или объемом и качеством существующей эмпирической информации, или же состоянием и уровнем развития теоретических представлений. Вследствие этого часто приходится ограничиваться либо приближенными решениями, либо решением более узких и частных проблем. Хорошо известно, какие ограничения иногда приходится делать в астрономии, физике, космологии, химии и молекулярной биологии вследствие отсутствия надежно работающего математического аппарата. В результате этого приходится вводить значительные упрощения (например, заменять нелинейные члены уравнения линейными и т. п.) и тем самым отказываться от полного решения проблемы.

Решение любой научной проблемы включает выдвижение некоторых догадок, предположений, а чаще всего более или менее обоснованных гипотез, с помощью которых исследователь пытается объяснить факты, которые не укладываются в старые теории. Многие научные открытия возникают в результате стремления устранить противоречия между существующими теориями и реальными фактами, а не ставят непосредственной целью обнаружение новых явлений и управляющих ими закономерностей.

Целью изучения дисциплин «Методы исследований машин», «Основы научных исследований и изобретательства» является ознакомление студентов с особенностями научных исследований, формирование правильных взглядов на науку, ее роль в современном обществе, особенно в современных условиях перехода отечественной экономики от преимущественно сырьевого направления к экономике инновационной.

Настоящее пособие ориентировано в первую очередь на студента и частично на магистранта и аспиранта, делающего первые шаги в освоении профессии исследователя. Оно предполагает ознакомление лишь с наиболее общими представлениями о науке, без которых невозможна выработка кругозора современного специалиста.

Данное учебное пособие не претендует на оригинальность представленного в нем материала. В сущности, все его разделы можно найти в литературных источниках, перечень которых приведен в списке библиографических ссылок. Авторы настоящего пособия лишь представили указанные материалы в логической последовательности, предусмотренной программами учебных дисциплин. Порядок изложения, пояснения и иллюстрации сохранены такими же, как в указанных литературных источниках, авторам которых мы приносим глубокую благодарность.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУКЕ

1.1. Основные понятия, роль науки в современных условиях

Под научными исследованиями понимается деятельность, направленная на получение новых знаний о природе и человеке. Иногда такую деятельность называют просто наукой, но термину «наука» чаще придается более широкий смысл. Наукой называют не только саму деятельность, но и результат такой деятельности, т. е. сумму знаний, полученных к данному моменту. Этот же термин может использоваться и для обозначения отдельных отраслей научного знания, например, науками называют математику, физику, химию, биологию, историю и т. д.

В настоящее время наука (и как деятельность, и как сумма знаний) выполняет две функции [20, с. 7].

Во-первых, она является частью общечеловеческой культуры, ибо в значительной мере определяет мировоззрение людей каждой эпохи и удовлетворяет их духовные потребности в познании окружающей жизни. Стремление глубже понять окружающий мир и действовать в соответствии с достигаемым пониманием является неотъемлемой частью человеческого сознания. Именно таким сделала человека длительная эволюция его развития. Естественно, что каждая историческая эпоха характеризуется своими, все более достоверными представлениями об окружающей действительности.

Во-вторых, наука является производительной силой общества, ибо она определяет технический уровень материального производства. Коренные изменения в образе жизни людей, произошедшие за последние тысячелетия и особенно за последние 200–300 лет, хорошо иллюстрируют именно эту особенность науки. Все, чем пользуется современный человек, – здания, сооружения, средства передачи и хранения информации, транспорт, медицина, продукты

питания, одежда и т. д. — базируется на достижениях науки. Как выражался физик Эдвард Теллер, «то, что сегодня наука, — завтра техника» [20, с. 8]. По мере развития общества такое качество науки проявляется со все возрастающей полнотой.

Последние десятилетия наблюдается тенденция сращивания науки с производством: создаются научно-производственные объединения, разрабатываются целевые программы с участием научных и производственных организаций, заключаются долгосрочные договоры научных и производственных организаций и т. д.

На научные исследования развитые страны расходуют значительные средства. Исследования во всем мире проводят специализированные научные учреждения или вузы. Практически во всех крупных корпорациях имеются свои группы исследователей или целые научно-исследовательские институты. Ведущую роль в зарубежной науке играют обычно вузы. В нашей стране, в силу сложившейся традиции (со времен Петра I), основная научная деятельность сосредоточена в научных учреждениях (в настоящее время называемых научно-исследовательскими институтами — НИИ), которые, как правило, лучше вузов оснащены оборудованием и располагают большими организационно-экономическими возможностями для исследований.

Продолжительность выполнения крупных научно-технических программ обычно составляет 5–10 лет, мелких — 1–2 года.

Доля научных работников в общей численности населения сильно возросла за последние три столетия, особенно в XX в. Согласно оценкам специалистов, во второй половине XX в. число научных работников составляло примерно 90 % от числа всех ученых, живших на Земле последние 2,5 тыс. лет. В технологически развитых странах доля ученых и инженеров, занятых в науке, составляет 0,15–0,5 % от населения страны. В бывшем СССР эта доля достигала 6 %, в настоящее время в России — примерно 0,3 %. К сожалению, российские ученые, занятые в прикладных науках, пока вынуждены заниматься преимущественно практической деятельностью (оказанием различных услуг в решении текущих вопросов),

наука в их работе составляет 5–10 %. Однако это явление временное, ибо оно связано с социально-экономическими потрясениями, происходившими в стране в 1990-е гг.

1.2. Классификация научных исследований

В зависимости от преобладания познавательной или практической направленности решаемых вопросов научные исследования (науки) разделяются на три категории, показанные на рисунке.



Классификация исследований (наук) по преобладанию познавательной и практической направленности решаемых вопросов

К фундаментальным относятся исследования (науки), результаты которых служат основой для других наук прикладного направления, т. е. они направлены на познание, на правильное понимание окружающего мира без привязки результатов к решению конкретных практических задач. К таковым относятся, например, исследования в области математики, физики, химии, биологии и др.

К прикладным относятся исследования (науки), направленные на поиск новых, более эффективных методов решения различных практических задач. Как правило, такие исследования основываются на результатах фундаментальных работ. В них всегда присутствует познавательный элемент, но он не является преобладающим, ибо представляет не цель, а средство решения конкретных задач

в той или иной сфере практической деятельности. Значительное место в них может занимать изобретательская деятельность. К такому относятся, например:

- технические науки, включающие как общетехнические дисциплины (сопротивление материалов, гидравлика, теория механизмов и машин и т. д.), так и отраслевые (относящиеся к строительству, машиностроению, авиации, электронике и т. д.);
- медицинские науки (анатомия, физиология, терапия, кардиология, хирургия, санитария и т. д.);
- сельскохозяйственные (агрономия, животноводство, ветеринария, экономика сельского хозяйства, лесное хозяйство и т. д.) и многие другие науки.

К разработкам относится наиболее практическая часть научно-технической деятельности, в которой ищутся не принципы и способы решения практических задач, а непосредственно решаются такие задачи. Это создание новых технологий, новых машин и механизмов, новых компьютерных программ, новых средств и способов лечения и т. д. Разработки, как правило, основываются на результатах прикладных исследований и всегда включают решения множества практических задач, не относящихся к научным исследованиям (стандартные расчеты, конструирование и т. д.). Обычно в них большое место занимает изобретательская деятельность.

Наиболее важная особенность разработок состоит в том, что они приносят непосредственный экономический или социальный эффект. Результаты разработок являются товарной продукцией, реализуемой на внутреннем и внешнем рынках по достаточно высоким ценам. В то же время большинство результатов фундаментальных и прикладных исследований таким товаром не являются и распространяются «бесплатно», путем публикаций в открытой печати и выступлений на симпозиумах (если, конечно, это не засекреченные исследования). Если в том или ином государстве недостаточное внимание уделяется разработкам, то оно обречено на техническое отставание, каким бы высоким ни был уровень его фундаментальных и прикладных исследований. Результаты исследований в таком государстве будут использоваться специалистами других

государств-конкурентов, которые получают возможность на основе заимствованных идей проводить свои разработки и получать соответствующий экономический эффект. Государство же, выдвинувшее эти идеи и выполнявшее исследования без необходимых разработок, будет нести только затраты, ничего материально не получая взамен.

По мнению экспертов ЮНЕСКО, в настоящее время наилучшие практические результаты для экономики страны дает следующее соотношение затрат на фундаментальные (Ф), прикладные (П) исследования и разработки (Р):

$$\Phi : \Pi : P \rightarrow 1 : 1,5 : 25,$$

т. е. на разработки следует расходовать примерно 90 % средств, выделяемых на инновации. Это обусловлено большими затратами, связанными с выполнением проектно-конструкторских и производственных (заводских) работ, с изготовлением и испытаниями многочисленных опытных образцов и т. д.

Иногда разработки относят не к научной, а к практической деятельности, но с этим можно согласиться лишь частично, ибо разработки могут содержать много новых технических идей, пригодных для последующего применения в других разработках.

Последние годы входит в употребление новый термин «инновации», означающий переход на более высокий технологический уровень производства, выпуск новой продукции, освоение новых форм организации труда, управления, обслуживания. Он охватывает как результаты разработок, так и их внедрение в практику. Соответственно используется и термин «инновационный процесс», подразумевающий проведение всех этапов инновации.

Приведенная на рисунке классификация в значительной мере условна, ибо многие исследования занимают промежуточное положение и их трудно точно отнести к какой-либо одной из приведенных трех категорий. По этой причине существуют и другие классификации, которые выделяют большее число категорий. Например, между фундаментальными и прикладными исследованиями добавляют «направленные фундаментальные» исследования (физика твердого тела, механика сплошных сред, реология и т. д.), раздельно

рассматривают общетехнические и отраслевые категории прикладных наук, прикладные исследования и разработки часто объединяют в одну категорию и т. д.

В отечественном делопроизводстве обычно используется упрощенное разделение с применением следующих аббревиатур: научно-исследовательские работы – НИР; опытно-конструкторские разработки – ОКР.

Существуют десятки классификаций наук по их содержанию (по отраслям). Специалисты ЮНЕСКО предлагают выделять пять разновидностей наук:

- естественные (физика, химия, математика, биология и т. д.);
- технические (машиностроение, строительство, металлургия, авиация и т. д.);
- медицинские;
- сельскохозяйственные;
- гуманитарные.

В России используется отраслевая классификация наук, принятая еще в бывшем СССР (классификация ЦСУ СССР), включающая 19 подразделений: физико-математические; химические; биологические; геолого-минералогические; технические; сельскохозяйственные; исторические; экономические; философские; филологические; географические; юридические; педагогические; медицинские; фармацевтические; ветеринарные; искусствоведческие; архитектурные; прочие.

В России, как и в бывшем СССР, принято, называя ученую степень конкретного лица, указывать вид наук в строгом соответствии с приведенной выше классификацией (например, кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, кандидат медицинских наук, доктор геолого-минералогических наук и т. д.).

1.3. Аттестация научных работников

Для оценки компетентности работников науки, т. е. их аттестации, во всем мире существует система ученых степеней и ученых званий. Четкой границы между понятиями «степень» и «звание»

нет, но в большинстве стран под «ученой степенью» понимается официальная оценка достигнутых результатов в форме защиты диссертаций (реже – иных научных достижений), а под «ученым званием» – подтверждение продуктивности последующей научной (научно-педагогической) деятельности работника вуза или научного учреждения.

Ученые степени и звания в разных странах отличаются друг от друга. Дипломы и аттестаты, получаемые за пределами страны пребывания научного работника, признаются не во всех странах. Существует система аттестации дипломов, полученных за границей, причем она касается не только ученых степеней и званий, но и дипломов об образовании. В странах, где нет единого образовательного стандарта, обязывающего все вузы точно выполнять государственные учебные программы, система аттестации дипломов распространяется и на дипломы, получаемые в своей стране.

Для получения ученых степеней необходима защита соответствующих диссертаций. Кандидатская диссертация должна содержать новые научные и практические выводы и рекомендации, подтверждать наличие у автора глубоких теоретических знаний и способности к самостоятельной работе. Докторская диссертация должна содержать теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы, представляющей значительный вклад в науку и практику. Это, как правило, комплекс научных задач, объединенных единой идеей, в ряде случаев представляющий новое научное направление. Обязательным условием защиты диссертаций является публикация основных результатов исследований, а в прикладных науках необходимо также внедрение в практику научных предложений автора.

Для получения ученого звания защиты диссертации не требуется, но необходимы дополнительные публикации, определенный стаж научной (научно-педагогической) деятельности, а для звания профессора требуется также подготовка определенного числа учеников – кандидатов или докторов наук. Звание доцента или старшего научного сотрудника присуждается при наличии ученой степени кандидата наук, звание профессора – при наличии степени

доктора наук. Исключения делаются лишь при особых заслугах, что решается в индивидуальном порядке.

В России в целях обеспечения государственной аттестации научных и научно-педагогических работников существует правительственный орган – Высшая аттестационная комиссия при Министерстве образования и науки Российской Федерации (<http://vak.ed.gov.ru>).

За рубежом в ряде стран ученые степени и звания присуждаются не правительственными органами, а непосредственно вузами, в связи с чем авторитет научного работника в значительной мере зависит от престижа вуза, который присудил ему соответствующее звание. По этой причине за рубежом при упоминании ученого звания принято называть университет, который это звание присудил. Система присуждения ученых степеней и званий за рубежом не унифицирована. Она может различаться не только в разных странах, но и внутри отдельных стран, т. е. разные университеты одной и той же страны могут по-своему устанавливать звания и степени.

В разных странах предъявляются неодинаковые требования к соискателям ученых степеней. Это относится даже к бакалаврам. Обычно это выпускник вуза, прошедший 4-летнее обучение в этом вузе. Тем не менее во Франции, например, бакалавром называют выпускника средней школы, а выпускника вуза именуют лицензиатом или доктором-инженером. Нечетко разграничиваются требования к доктору философии и доктору наук, некоторые вузы присуждают только одну из этих степеней, переходя в какой-то мере на трехступенчатую систему. Более или менее стабильными в зарубежных странах являются требования к доктору наук.

Эквивалентность дипломов об образовании или научной квалификации определяется специальными межправительственными конвенциями. Комиссия ЮНЕСКО, изучавшая этот вопрос в 1973 г., пришла к выводу, что требования к доктору наук в США и в Западной Европе приблизительно совпадают с требованиями, предъявлявшимися к кандидату наук в СССР (и, следовательно, нынешней России). Таким образом, эквивалента российскому доктору наук западные системы не устанавливают.

Кроме упомянутых выше ученых званий в России (как и в других странах) существуют звания академика и члена-корреспондента академии наук; эти звания имеют ограниченное число наиболее выдающихся ученых страны. С 1724 г. существует Российская академия наук (РАН), в настоящее время включает около 500 действительных членов (академиков) и около 800 членов-корреспондентов (почти все – работники фундаментальных наук). Такие звания присуждаются за особые заслуги в развитии науки собранием действительных членов академии путем тайного голосования.

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ НАУКИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Все начинается с любопытства [2, с. 7]. Любопытство, непреодолимая тяга к познанию, не присуще мертвой материи. Оно также несвойственно и некоторым формам живого организма. Дерево, где бы мы его ни встретили, не проявляет любопытства относительно окружающей его среды. Также любопытства не проявляют губка или устрица – ветер, дождь и морские течения приносят им все, что необходимо для существования. Если же провидение насылает на них огонь, яд, хищников или паразитов, они умирают так же стоически, как жили.

Постепенно некоторые организмы значительно продвинулись в контроле над окружающей средой. Способный двигаться организм не должен был бесстрастно дожидаться пищи.

Это означало, что в мир проникло приключение и любопытство. Индивидуум, который колебался, решая, следует ли начинать охоту за пищей, и был чрезмерно консервативен в исследованиях, – голодал.

Отсюда следует, что способность получать, хранить и объяснять сообщения из внешнего мира может опережать насущную в них потребность. Организм в какое-то мгновение может перенасытиться пищей и не испытывать опасности. Что тогда делать дальше?

Чем более развит ум, тем больший стимул дает он для изучения и тем больше мы любопытствуем. Обезьяна – символ любопытства. Ее маленький мозг всегда чем-либо занят. И в этом отношении, как и во многих других, человек – всего лишь «суперобезьяна».

Человеческий мозг – самая уникальная живая материя в познанном мире, и ее способность получать, систематизировать и хранить данные в объеме, значительно превышающем жизненные потребности, удивительна. Подсчитано, что на протяжении жизни человек может осознать до 15 триллионов информационных сообщений [2].

Именно благодаря этому излишку мыслительной способности мы страдаем такой мучительной болезнью, как скука. Когда человек попадает в ситуацию, при которой у него нет возможности использовать свой ум на что-либо большее, чем минимальное выживание, он постепенно начинает испытывать неприятные симптомы, вплоть до серьезных умственных расстройств.

И это означает, что у здравомыслящего человека есть сильное и непреодолимое любопытство. Если он лишен возможности удовлетворить любопытство в тот момент, когда это действительно ему необходимо, то в конце концов найдет способ это сделать.

Наука – древнейший вид деятельности. Первоначально она строилась только на наблюдении и рассуждении. Затем постепенно в науке все большее место стали занимать измерения, расчеты, математическое моделирование. Происходила специализация наук. Научная деятельность в древности была неотделима от философии, она не была свободна от влияния многих религиозных и оккультных представлений. В дальнейшем от философии стали отделяться самостоятельные науки – физика, математика, медицина, астрономия, география и т. д. Оккультные знания все больше оттеснялись, заменялись научными. Религия все меньше использовалась для объяснения природных явлений. В целом ученые Древнего мира заложили основы многих наук, к которым в первую очередь следует отнести упомянутые выше математику, логику, физику, механику, астрономию, медицину. Навсегда вошли в науку имена Евклида, Аристотеля, Архимеда, Птолемея, Гиппократы и др.

Ушедший XX в. можно с полным правом назвать и «временем инженерии», и «веком инженеров». Прогресс науки и техники привел к расцвету инженерной профессии, мобилизовал невиданные созидательные силы и в то же время возложил на инженеров немалую ответственность за судьбы человеческой цивилизации. Прежде чем приобрести нынешнее значение и размах, профессия инженера, само инженерное дело прошли непростой, исторически длительный путь становления. Ценой усилий многих поколений человечество по крохам добывало знания, накапливало технические умения, готовя почву для ростков инженерной мысли.

Без участия инженерных кадров невозможно сегодня представить оперативное решение ни одной из сложных проблем, выдвигаемой новой научно-технической и экономической реальностью. Ведь наука непосредственно соединяется с техникой и воплощается в проектах сложных агрегатов, автоматизированных линий, мощных производственных комплексов, прежде всего, благодаря творческим усилиям большого и разнообразного по своему составу отряда инженеров. Инженерная деятельность является на сегодняшний день ключевым звеном в известной цепочке «наука – техника – производство», и вместе с тем она превратилась в наиболее массовый вид высококвалифицированного умственного труда. Новая техника требует, с одной стороны, качественно иного инженерного мышления, направленного прежде всего на поиск оптимальных решений в области человеко-машинных взаимодействий, а с другой – нравственной зрелости инженерного работника, умения решать сложные технические проблемы «человечно».

Кстати, слово «инженер», означающее знания, гений, способность, талант, ум, остроумная выдумка, изобретательность (лат.), впервые стало использоваться для обозначения особого рода занятий в античном мире, по-видимому, не ранее III в. до н. э. Причем так назывались лица, управляющие военными машинами, а также изобретатели этих машин. Менялось время, развивались производительные силы общества, расширялся объем понятий «инженер» и «инженерное дело», но неизменным оставалось одно – инженерами называли людей, связанных с созданием различной техники, ее разработкой и эксплуатацией, т. е. специалистов, обладающих техническими знаниями, способными создавать разнообразные технические структуры.

2.1. Сущность инженерной деятельности и ее зарождение

В истории становления и развития производительных сил общества на различных этапах проблема инженерной деятельности занимает особое место [11]. Инженерное дело прошло довольно

непростой, исторически длительный путь становления. История материальной культуры человечества знает немало примеров удивительного решения уникальных инженерных задач еще на довольно ранних этапах развития человеческого общества. Если мы обратимся к истории создания знаменитых семи чудес света, то убедимся в наличии оригинального решения конкретных инженерных проблем.

Семь чудес света получили свое название во времена античности как сооружения, поражающие своим великолепием, размерами, красотой, техникой исполнения и оригинальностью решения инженерных проблем. К ним относятся: египетские пирамиды, появившиеся почти 5 тыс. лет назад (28 в. до н. э.), имя одного из первых зодчих, решивших ряд инженерных проблем при их сооружении, было Имхотен; храм Артемиды Эфесской (V в. до н. э.); мавзолей в Галикарнасе; «висячие сады» Семирамиды; Фаросский маяк (III в. до н. э.), создателем этого чуда был Сострат; Зевс Олимпийский (V в. до н. э.), творцом которого являлся прославленный скульптор Фидий, а также Колосс Родосский (IV в. до н. э.), сооруженный известным скульптором Харесом. Имеются и другие свидетельства гениального решения инженерных проблем в глубокой древности. Профессия инженера, «представителя инженерного цеха» по праву может отстаивать место на одной ступени пьедестала с охотником, врачом, жрецом.

Вместе с тем история материальной культуры иногда отрицает наличие инженера в обществе древности, а в этой связи и наличия целенаправленной инженерной деятельности так, как мы понимаем эту деятельность сегодня, как она наполнена в век электричества, электронно-вычислительных машин, спутников, межконтинентальных воздушных лайнеров и ракет. Но некоторое отрицание инженера и инженерной деятельности на ранних ступенях развития общества еще не означает отрицания инженерной деятельности вообще при решении конкретных задач. Она в различных формах существовала в человеческой истории, и существовала вполне активно.

Как уже отмечалось выше, на заре становления общества не было в явном виде инженерной специальности (это результат позднейшего общественного разделения труда), ни тем более «инженерного

цеха», «касты», «корпорации» или, пользуясь строгим научным термином, – социально-профессиональной группы. Но за многие века, даже тысячелетия до того, как общественный способ производства сделал возможным и необходимым появление инженеров в полном смысле этого слова, перед людьми возникали инженерные задачи и находились индивиды, способные их решать. Ведь человеческая цивилизация основана на преобразовании природного мира с помощью орудий труда, т. е. совокупности разнообразных технических средств. История их создания – одновременно и история инженерной деятельности.

Забегая вперед, скажем, что на сегодняшний день формула «Инженер – создатель новой техники» несколько устарела. Она оправдывает себя только для узкого интервала значений терминов «инженер», «инженерный труд», «инженерная профессия», оставляя вне поля зрения поистине необозримое пространство современных (не говоря уже о будущих) задач, проблем, функций инженерной деятельности. Но в ретроспективном путешествии в прошлое инженера, к истокам могучего потока технического прогресса, главными ориентирами для нас послужат технические новшества.

История инженерной деятельности относительно самостоятельна; ее нельзя свести ни к истории техники, ни к истории науки. Корни ее теряются в глубине прошедших тысячелетий. Зачастую мы можем догадываться, какого упорства и таланта требовал каждый новый шаг в освоении и преобразовании мира, какие творческие коллизии, взлеты и крушения скрыты от нашего взгляда дымкой веков. Данные археологических раскопок позволяют лишь очень приблизительно реконструировать уровень знаний и умений, доступных творцам техники далекого прошлого. Судить об особенностях инженерной деятельности давно ушедших поколений приходится по ее результатам, сохранившимся в натуре или хотя бы в описании. И техника может рассказать о своих создателях очень многое.

Кстати, возникает вопрос, что такое техника? Слово это настолько вошло в обиход, что задавать вопрос о его значении кажется, на первый взгляд, чуть ли не бестактным обвинением в невежестве. Но оказывается, что на самом деле термин этот воспринят

нашим обыденным сознанием в довольно расплывчатом виде. Существуют десятки официальных определений. На заданный, что называется, «в лоб» вопрос «Что такое техника?» собеседник обычно начинает мяться, произносит: «Техника – ну, это, в общем...» И дальше – в зависимости от уровня знаний и склада мышления, умения формулировать и т. п. Например: «Техника – это что-то громоздкое, надвигающееся, бездушное» – определение поэта. «Техникой является все, что связано с металлом» – точка зрения инженера. «Техника – область знания, отражающая принципы и законы создания и действия машин, приборов, механизмов» – формулировка ученого.

Так что же такое техника? Большинство современных исследователей считают, что под техникой надо понимать совокупность искусственно созданных орудий труда людей. Техника создается и применяется в целях получения, передачи и превращения энергии, воздействия на предметы труда при создании материальных и культурных благ, сбора, хранения, переработки и передачи информации, исследования законов и явлений природы и общества, передвижения, управления обществом, обслуживания быта, обеспечения обороноспособности и ведения войн.

По своему происхождению именно техническая деятельность стала одним из первых видов социальной деятельности. Чтобы выжить, добыть пищу, защитить себя от диких животных, первобытные люди вынуждены были прибегнуть к помощи орудий. Переход к труду, основанному на применении орудий, первых примитивных технических средств, был необходим. Все доступные нам факты борьбы рода человеческого за выживание подтверждают, что техническое (технологическое) направление и характер цивилизации являются не случайностью и не ошибкой общественного развития, а единственно возможным его путем.

Изготовление орудий, переход к производству – это та грань, тот скачок, который позволил человечеству преодолеть пропасть, отделяющую животный мир от мира цивилизации. Длился этот скачок невообразимо долго: по сравнению с ним превращение желудя в вековой дуб кажется мгновенным взрывом. Достаточно

сказать, что возраст обнаруженных в ходе археологических раскопок возле озера Рудольф (Кения) первых искусственных орудий труда – они изготавливались из гальки – составляет 2 млн 600 тыс. лет! У этих заостренных кусков камня нет еще даже определенной формы. Но нет и сомнения, что они создавались целенаправленно. Об этом говорит сходство приемов обработки.

Невзрачные камешки, покоящиеся на музейных стендах, обладают огромным историческим весом. Это зародыши мощного арсенала современной техники и технологии, материальной и духовной культуры человечества. Наряду с прочими, эти зародыши несут и ген инженерной деятельности. Ведь прежде чем техника, пусть даже самая что ни на есть простейшая, будет использована, она должна быть создана. Если даже впоследствии вещь, орудие труда изготавливались миллиарды раз, то когда-то же они были созданы впервые. Стало быть, неким далеким предком были не просто подмечены и использованы полезные качества природного предмета, но и найден путь к тому, как эти качества изменить, приспособить для удовлетворения человеческих нужд. А это уже предполагает элемент технического творчества, крупницы инженерного мышления. Конечно, изрядным преувеличением было бы видеть в косматом антропоиде, раскалывающем голыши о прибрежные скалы, прямого, хотя бы и отдаленного, предшественника современного специалиста – химика или «электронщика». Однако первичная схема инженерной деятельности «техническая идея – изделие» может быть обнаружена на самом раннем этапе становления техники.

Характер и содержание технической деятельности на ранних стадиях человеческой истории менялись крайне медленно; наверняка технические новинки сотни раз находились и сотни раз утрачивались, погибали вместе с их изобретателями. Однако общее направление развития техники не вызывает сомнений. Тенденция к совершенствованию приемов труда, увеличению их эффективности явственно прослеживается хотя бы на примере количественного нарастания операций первобытной технологии. Так, первые галечные орудия получали 3–10 ударами, древнейшие ручные рубила – 10–30, ручные рубила правильной геометрической формы –

50–80 ударами. Изготавливая галечные сколы, наши далекие предки применили одну операцию – оббивку, а для производства рубила нужны были уже три операции: отщепление заготовки, оббивка, ретушь.

Шли тысячелетия, и вместе с ними неуклонно шел дальше и дальше технический прогресс. На границе между верхним и нижним древнекаменным веком (палеолитом), примерно 40–30 тыс. лет назад, завершается предыстория человеческого общества и начинается его история. Этот переход совершился во многом благодаря накопленным техническим достижениям. В производственной деятельности человек освоил много новых пород камня, научился изготавливать свыше двадцати видов различных каменных орудий (резцов, сверл, скобелей и т. п.). Были созданы гарпун и копье-металка.

Но улучшение традиционных приемов обработки камня уже не повышало эффективности производимых орудий. Требовалось принципиально новое решение. И оно было найдено. Были изобретены и – как мы иногда говорим – «нашли широкое применение в практике» так называемые вкладышевые орудия. Апофеозом инженерной мысли каменного века стал лук. Человек, сообразивший, как использовать потенциальную энергию согнутой палки, натянувший на нее тетиву из жил животных и заостривший тонкую стрелу, совершил эпохальное техническое открытие.

Стоящие перед создателем лука и стрел сложности были двоякого рода: во-первых, необходимо было объединить разные технические элементы в одном орудии; во-вторых, осмыслить и доказать преимущества нового приспособления. Отметим, что преимущества лука по сравнению с прежними видами оружия были настолько очевидны, что он довольно скоро получил признание у разных племен и народов. И результат быстрого внедрения не замедлил сказаться – жизнь охотничьих племен заметно облегчилась, освободилось время для других видов деятельности.

Широкомасштабное применение лука, вкладышевых орудий, шлифованных топоров, тесел, мотыг, долот и прочих технических достижений новокаменного века (неолита) подготовило производ-

ственную революцию, разрешившую противоречие между возросшим уровнем производительных сил и традиционной для первобытной общины «уравниловкой» в распределении. Сущность так называемой неолитической революции – в переходе от охоты к земледелию и скотоводству. «Родовой строй отжил свой век. Он был взорван разделением труда и его последствием – расколом общества на классы».

Нас, впрочем, интересует не столько историческое или социально-экономическое значение технических новшеств первобытно-общинного строя, сколько процесс накопления технико-технологических открытий и изобретений как отражение роста творческой мощи человека. В период неолита достоянием человечества сделались новые приемы обработки материалов – пиление, шлифование, сверление, появились составные орудия, был приручен огонь. Трудно, точнее говоря – невозможно, представить, что эти элементы материально-технической культуры возникли без целенаправленной умственной работы их создателей. Можно согласиться, что познание, техническое проектирование и организация производства не были расчленены и не существовали вне повседневной рутинной деятельности.

Однако генетическая связь того, что человек делал, с тем, что он задумывал, планировал сделать, не заслоняет такого факта, что для решения технических проблем периода между дикостью и варварством нужен был довольно высокий уровень аналитико-синтетических свойств мышления. Поэтому уже применительно к первобытно-общинному способу производства мы вправе говорить о существовании инженерной деятельности в ее неявной форме. Обозначим ее как доинженерную деятельность.

Накопление прибавочного продукта (при капитализме его создает наемная рабочая сила), ставшее возможным благодаря успехам техники, привело к дальнейшему расслоению общества. Появилось рабство, сменившее древнюю общину. Возникли классы и государство. Ширилась специализация труда. Если в ранние периоды земледелия семья изготавливала орудия труда, оружие, утварь самостоятельно и каждый дом, подворье были одновременно

и мастерской, то при становлении рабовладельческого способа производства происходит обособление ремесел. Это второе крупное общественное разделение труда порождает ремесленника – человека, занятого главным образом технической деятельностью.

Материально-технической основой перехода от домашнего ремесла к специализированному ремесленному производству послужили ирригационное земледелие и распространение металлических орудий. Если первые немногочисленные медные предметы – шильца, проколки, бусинки – найдены при раскопках культурного слоя VII–VI тыс. до н. э., то в V тыс. до н. э. орудия из меди и ее сплавов встречаются все чаще и чаще. Использование цветных металлов в хозяйственной деятельности стало предпосылкой изобретения колесного транспорта и гончарного круга, а также бронзового плуга. В рабовладельческую эпоху были сделаны и многие другие технические открытия: налажено производство стекла, изразцов, шелковой ткани.

Однако центром технической (и инженерной) деятельности было строительное дело. Возникновение древних городов, которые становились центрами ремесленного производства, возведение культовых и ирригационных сооружений, мостов, плотин, дорог требовало кооперации труда огромного количества людей. Колоссальные защитные сооружения были возведены вокруг Вавилона: город окружали три ряда стен, каждая из которых была толщиной 8–12 м. Самая большая из египетских пирамид – усыпальница фараона Хуфу (Хеопса) – возвышается над пустыней на 150 м. На ее постройку ушло около 2 300 тыс. каменных блоков весом от 2 до 15 т каждый. Сто тысяч людей выполняли эту работу непрерывно в течение 20 лет.

Древний историк Геродот свидетельствует, что в IV в. до н. э. в горах Ливии была сооружена плотина, изменившая русло Нила. Там, где раньше протекала река, был построен город Мемфис.

Перечень великих свершений зодчих древности можно было бы продолжить. Но и из сказанного очевидно, что «ни одно крупное и сложное сооружение древности не могло быть построено без детально разработанного проекта, требующего обособления

целеполагающей деятельности. В процессе строительства технический замысел (проект) мог быть реализован только на основе совместного труда рабов. Именно так создавались первые инженерные сооружения, такие как городские системы и шахты Шумерийского государства, ирригационные каналы и пирамиды Египта» [11, с. 34].

Как же осуществлялась эта простейшая кооперация труда рабов? Явно недостаточно было номинально обладать властью над тысячами людей, чтобы суметь использовать их труд при возведении крепостей, дворцов, храмов. Заставить рабов трудиться мог, конечно, любой царек или рабовладелец. Но для того, чтобы организовать трудовые усилия больших масс низкоквалифицированных работников, подчинить их единой задаче, требовался инженер. Архитектурное дело и строительство стали исторически первой областью производства, где возникла потребность в людях, специально занятых функциями проектирования и управления (инженера).

Сложный умственный труд, благодаря которому первоначальный технический замысел вызревал, обрастал конкретными деталями, становился проектом, не мог уже быть выполнен походя. Во-первых, для того, чтобы продвинуться вперед в поиске архитектурной формы, сочетающей прочность, удобство и гармоничную соразмерность, нужно было проникнуть в тайны сделанного предшественниками, не копировать, а переосмыслить и обобщить их достижения. Во-вторых, новые, усложнившиеся инженерно-строительные задачи не допускали решения «на глазок». Они оказывались по плечу тому, кто способен был не только поймать за хвост жар-птицу конструктивной идеи, но и поместить ее в клетку конкретного расчета, рисунка, макета. А для этого следовало овладеть нехитрым – с позиций сегодняшнего дня, но достаточно обширным арсеналом специальных инженерных средств и инструментов. Во времена Древней Греции и Рима в распоряжении инженера-строителя различных конструкций были циркуль (его, кстати, знали еще вавилоняне), счетная доска – так называемый абак, нивелиры и другие простейшие геодезические приборы.

Иными словами, для успешного решения древнеинженерных задач периода рабовладения требовался не только практический опыт, но и специальные знания и умения. И еще время, свободное от забот о хлебе насущном. Отделение умственного труда от физического и противопоставление их друг другу имели четко выраженную классовую окраску, поскольку досугом и материальными средствами для овладения элементами духовной культуры располагали лишь представители эксплуататорского класса. Соответственно и технические достижения служили одним из средств порабощения труда.

Таким образом, материально-техническая и духовная культура человечества в эпоху рабовладения достигла такого уровня, что в отдельных ее сферах – строительстве и архитектуре – возникла потребность в профессиональном инженерном труде. Сквозь тысячелетия дошли до нас имена египетского жреца-архитектора Имхотепа (ок. 2700 г. до н. э.), китайского гидростроителя Великого Юя (ок. 2300 г. до н. э.), древнегреческого зодчего и скульптора Фидия – создателя афинского акрополя Парфенона (V в. до н. э.). Были ли они инженерами? И да, и нет. Ответ на этот вопрос неоднозначен, и вот почему. Для производства периода поздних рабовладельческих государств характерно появление сложных технических задач нового класса, решение которых предполагало обособление инженерно-технических и инженерно-управленческих функций. Здравый смысл подсказывает, что тех, кто эти функции выполнял, мы вправе назвать инженерами.

Вместе с тем, видимо, следует заметить, что, во-первых, функции инженерного труда не сводятся к двум названным выше, они гораздо шире. Во-вторых, деятельность первых инженеров опиралась главным образом на практические, опытные знания, а также на весьма примитивные технические средства; универсальным и, увы, малоэффективным технологическим приемом было массовое применение рабского труда. В-третьих, умственный труд, отпочковавшись от физического, долгое время оставался нерасчлененным. Так, в рабовладельческом обществе естествознание, не говоря уже о точных (тем более – о технических) науках, не успело выделиться в самостоятельную отрасль знания. Оно входило в обще-

философскую систему, которая охватывала все множество знаний. Каждого инженера древности можно с не меньшим основанием именовать ученым, философом, писателем. Иначе говоря, любой инженер того времени заведомо «обязан» был быть мудрецом, любой мудрец одновременно владел инженерным делом. В качестве примера такой цельности вспомним древнегреческого мыслителя Фалеса или его ученика и последователя Анаксимандра (VI в. до н. э.).

Исходя из приведенных выше соображений, точнее можно обозначить этот период становления инженерии как предынженерный. Хронологически его рамки довольно широки – от II–I тыс. до н. э. до XVII–XVIII вв. современного летоисчисления. Этот период неоднороден с точки зрения способа производства – рабовладичество сменил феодализм, который, в свою очередь, готовился уступить место капитализму. Менялось общественно-политическое устройство: возникали и гибли империи, возвышались и приходили в упадок нации, классы, религии. Развивалась техника и технология, рождались гениальные изобретения, создавались принципиально новые технические объекты, изделия, инструменты, приемы обработки материалов. Неизменным оставалось одно: основным создателем технических нововведений, субъектом технической деятельности по-прежнему оставался ремесленник.

Достижения ремесленной деятельности древности и Средневековья поражают воображение. Военное дело, сельское хозяйство, мореплавание, металлургическое, текстильное, бумажное производство – вот далеко не полный перечень областей деятельности, где в предынженерный период развития техники произошли технические революции. Вспомним, к примеру, замечание К. Маркса: «Порох, компас, книгопечатание – три изобретения, предвещающие буржуазное общество».

Многие технологические приемы древнего ремесла настолько уникальны, что не могут быть воспроизведены даже на основании современных научно-технических знаний. Объяснение им ищут порой в магии, вмешательстве пришельцев, разного рода «чертовщине» или в неких технических секретах, забытых, утраченных или находящихся под запретом религиозно-жреческих «табу»...

Металлурги Древней Индии поражают своим искусством. Индийцы давно научились плавить качественную сталь, делать отливки, чеканки. Вот уже почти 16 веков стоит восьмое чудо – делийская колонна диаметром у основания 0,4 м и высотой 7,5 м. Вес ее около шести тонн. Древние мастера сделали ее из отдельных кусков железа, сваренных в кузнечном горне. Колонна была воздвигнута в 415 г. в честь царя Чандра Гупты II, скончавшегося в 413 г. Она посвящена богу Вишну. Первоначально находилась на Востоке страны и стояла перед храмом. В 1050 г. царь Ананг Пола перевез ее в Дели. Самое удивительное, что колонна стоит сотни лет и не ржавеет. Время оказалось бессильным, на нее не действуют ни ливни, ни тропическая жара.

С давних времен стекались к ней толпы богомольцев – считалось, что тот, кто приложится к ней спиной и обхватит ее руками, будет счастлив. Много легенд о делийской колонне сложили люди. Это чудо даже приписывали творению рук инопланетных пришельцев. Но факты говорят о том, что ее делали люди из очень чистого металла (99,720 % железа), и в этом весь секрет. Некоторые даже говорят, что современным металлургам до сих пор не под силу добиться подобного результата. Или еще одна загадка. В Китае есть гробница полководца Чжоу Чжу, умершего в конце II в. Когда исследователи провели спектральный анализ некоторых элементов металлического орнамента гробницы, то были удивлены. Оказалось, что древние мастера изготовили орнамент из сплава, который содержал 85 % алюминия. Однако производство алюминия сегодня немыслимо без электролиза, о котором в те времена никто и не слышал. Может быть, китайские умельцы знали другой способ его получения, утерянный со временем?

Или возьмем известные нам семь чудес света. Эти великие произведения древних мастеров поражали воображение современников своей монументальностью, простотой, оригинальностью решения инженерных проблем при создании этих классических чудес. Почти все они сделаны из камня. Трудно сказать, какое из чудес чудесней. Может быть, восьмое? Из металла?

На заре своего существования человек сталкивался главным образом с камнем. Но однажды он нашел ярко окрашенный кусок медной руды. Самые первые металлические орудия человек изготовил именно из самородной меди в Египте в V тыс. до н. э. Несколько позже появилась бронза – сплав меди с оловом и другими металлами.

Медь и ее сплав с оловом – бронза – долгое время были самыми распространенными металлами. Целая эпоха в развитии человечества называлась бронзовым веком. Шествие бронзы по планете было стремительным. Но вот загадка. Почему первые изделия из бронзы появились именно там, где совершенно не было необходимого сырья, и олово везли морем с Кавказа, Пиренейского полуострова и Британских (оловянных) островов к древним очагам цивилизации – в Египет и Двуречье? Видимо, металлургия пришла в Египет из какой-то другой страны.

Бронзовый век принес человечеству новые загадки. Археологи до сих пор находят такие бронзовые изделия, которые смущают даже современных металлургов. Несколько лет тому при проведении археологических раскопок найдена бронзовая статуя лежащего Будды длиной около 10 м. Ученые утверждают, что «возраст» этой уникальной отливки 7–8 тыс. лет. Процесс получения фасонных бронзовых отливок известен в Абиссинии, Египте, Индии, Древней Греции еще в IV–III тыс. до н. э., т. е. литейное ремесло является одним из старейших на нашей планете.

В национальном музее Египта в Каире хранится литая бронзовая скульптура одного из фараонов. Скульптуре около 2 500 лет. Она отлита в рост человека и является пустотелой, со стенками толщиной от 15 до 30 мм. Следует заметить, что никакой другой способ обработки металлов не может соперничать с литьем в деле создания произведений подлинного искусства. Это подтверждают века человеческой истории. Известна, например, крупная бронзовая статуя Афины Промехос на Акрополе высотой более 15 м, изготовленная в мастерской знаменитого греческого скульптора Фидия около 460 г. до н. э.

Как все это было выполнено, какова технология решения этих проблем? В раскопках, относящихся еще к VIII–VI вв. до н. э., археологи находят ножи, наконечники стрел, щиты и шлемы, изготовленные из меди и бронзы. Литейщики того времени, творившие на территории нынешнего Пенджаба, умели отливать серпы, пилы, копья, мечи, кинжалы, топоры. Как изготавливались эти предметы быта, орудия, украшения?

Длинный и сложный путь к прогрессу прошел человек. От каменного топора – к меди и бронзе, к железу и металлам космической эры.

Легенд, вымыслов, небылиц хватало в истории техники во все времена. Нельзя, конечно, всерьез относиться к технологическим рецептам превращения меди в золото с помощью пепла василиска, размягчения драгоценных камней в крови козла или производства небьющегося стекла путем сбрызгивания его поверхности кровью дракона. Однако в тайниках души нет-нет да и шевельнется слабая надежда на чудо: «Вдруг в глубине веков спрятано что-то удивительное, загадочное и такое нужное нам сегодня?» Хочется верить, что тысячелетия назад в небе Древней Индии летали реактивные самолеты – виманы (тем более, что аппарат, построенный по указаниям древних рукописей, поднимался в воздух в 1895 г., за восемь лет до полета братьев Райт). Или что великий Леонардо да Винчи действительно создал водолазное снаряжение, «в котором можно находиться под водой как угодно долго» [11, с. 21].

Что же могли и чего не могли старые мастера-ремесленники?

Успехи ремесленничества в решении инженерно-технических задач неоспоримы, и все же этот путь развития технического творчества – тупиковый!

Но не разобравшись в прошлом, нельзя осмыслить диалектику сегодняшних перемен в инженерном деле.

Инженерную сторону технической деятельности периода ремесленного производства оценивают по-разному. Чаще всего источники технического творчества ремесленников видят в обыденном, хаотически накопленном знании, основанном на «голом эмпиризме, простых обобщениях, наблюдениях и рецептах», т. е. в профессиональной сноровке. Случай, удача не нуждаются в письменных правилах.

В то же время сторонники этого подхода признают, что «совокупность взаимосвязанных процессов и приемов, эмпирически освоенных в тысячелетней практике их осуществления и изменения», есть реальное, хотя и не теоретическое знание, которое зафиксировано в виде практических навыков, расчетно-рецептурных технологических схем [11, с. 25].

Другая концепция гласит, что наука и инженерия – прямые потомки практических искусств и ремесел, ибо «осмысление опирающейся на эмпирические наблюдения практики создания и использования новых технических средств исторически было первой формой новых понятий технического знания» [11, с. 26].

Какой же из этих подходов ближе к истине? Как следует относиться к ним?

И в том, и в другом содержится «рациональное зерно», однако оба они не отражают сути ремесла как способа технического творчества. Это явление со своей необычной логикой трудно поддается пониманию человека, воспитанного в духе научного мировоззрения. Донаучное знание – функциональный заменитель науки – не было результатом целенаправленного изучения природы. Законы мира, качества предметов осваивались непосредственно – чувствами, руками, а уж потом мышлением. Не было деления на «знать» и «применять знания»; теория и практика были неразделимы и с точки зрения современной науки – неформализуемы. Интересен анализ истории бронзолитейного ремесла, проведенный историками.

Человечество освоило металлы и их сплавы еще на заре цивилизации. Постепенно создавались технологические приемы, рецепты, инструменты. Возникли и письменные памятники, хранящие ремесла. Эти своеобразные технические «энциклопедии» (в числе их авторов Плиний, Теофил Пресвитер, Бирингуччо) определяли нормы технической практики. Тогда возникает вопрос, чем же это не теория ремесла, чем же не наука? Дело в том, что подобные трактаты содержали не систему, а набор знаний, правильные рецепты соседствовали с ошибочными или фантастическими. И, кроме того, письменные сборники передавали лишь часть практического знания (отсюда и легенды о секретах древних мастеров).

Показательна в этом отношении древнекитайская книга «Чжоу ли» («Записка для контроля работы ремесленников»), хронологически относящаяся к III в. до н. э. В ее главе «Као-гун-цзы» («Шесть рецептов») приведены пропорции соотношения меди и олова в сплавах для различных изделий. Для колоколов и котлов, к примеру, требуется $\frac{1}{6}$ часть олова и $\frac{5}{6}$ меди, для мечей – $\frac{1}{3}$ олова и $\frac{2}{3}$ меди, для зеркал медь и олово берутся поровну и т. п. Казалось бы, все ясно. Бери, переплавляй, отливай. Не тут-то было! При наличии примесей более 2 % о собственных физических свойствах сплава меди и олова нужно забыть. Так что за коротенькой формулой рецепта прячется неописанная, но необходимая технологическая система очистки исходных материалов. Измерить количество инородных примесей в металле древний мастер не мог; тем не менее ему удавалось получить нужный сплав с соответствующими качествами. Каким образом? Успешные действия металлургов прошлого основывались на наглядно-чувственном способе технического мышления, внешней формой которого служил рецепт.

По отношению к донаучному этапу технической деятельности понятие рецепта наполняется существенно другим содержанием, чем по отношению к его современным нормам. Сейчас в нашем понимании рецепт или рецептурность есть действительно слепой эмпиризм, сборник сведений на все случаи жизни или правило обыденного сознания. В условиях же донаучного сознания рецепт, эта элементарная абстракция в форме числового отношения, образует некоторую первичную разновидность технического языка, возникающего как средство достижения определенной цели.

Образно говоря, технологический рецепт времен Средневековья представлял собой «вершину айсберга», тогда как главная, невидимая нам часть ремесленного мастерства состояла в особом способе мировосприятия. Рабочему и в наши дни приходится иногда работать «на глазок», скажем, определять температуру нагретого металла для его закалки. Так же действовали металлурги и кузнецы тысячелетия назад. Но если для ремесленников прошлого признаком этой готовности был сам цвет, то для современного рабочего цвет является прежде всего показателем нужного темпера-

турного режима. Абстракция вытесняет красочность в буквальном смысле слова. Для того чтобы действовать, рабочему наших дней недостаточно чувственных впечатлений, они должны быть соотнесены с абстрактным научным понятием.

Необходимо подчеркнуть, что взаимодействия ремесла и науки, строго говоря, не было. Ремеслу, технической мысли Средневековья требовались теоретические основания. Однако наука того времени была слишком умозрительной, слишком схоластичной, чтобы помочь технической практике перейти от методов рецептурных к методам инженерным. Подспорьем в решении технических задач служили лишь геометрия и искусство счета. Место науки в системе ремесленного знания занимал миф, сам по себе к научному знанию никакого отношения не имеющий. Но наличие хотя бы какой-то объясняющей теории или квазитеории позволило впоследствии включить в техническое знание иную, научную объяснительную систему и тем самым сделать это знание инженерным.

Следует заметить, что господство ремесленника в сфере технического творчества не было абсолютным. Хотя магистральным путем развития техники был путь проб и ошибок, параллельно ему из глубины веков тянется тропинка рационального осмысления технических проблем. Далеко не всех из тех, кто ее прокладывал, мы знаем поименно. В числе первых – Архит из Тарента (V–IV вв. до н. э.), применивший математический аппарат к исследованию технических устройств; Евклид, создавший начертательную геометрию; Диоген Лаэртский и др. Невозможно не упомянуть о легендарной личности Архимеда (ок. 287 – 212 г. до н. э.). Вклад этого древнегреческого мыслителя в развитие технических основ цивилизации грандиозен; его деятельность мы вправе именовать инженерной без малейших скидок, оговорок. Достижения Архимеда в области рациональной и технической (прикладной) механики, как считают историки, представляют собой первую в истории теоретическую систему научно-технического знания, которая завершает развитие предпосылок технических теорий.

Задачи теоретических исследований великого эллина вытекают из потребностей современной ему технической практики. К тому

времени в военном деле, кораблестроении, ирригации, горнорудных работах назрели технико-технологические вопросы, ответить на которые с позиций прежнего опыта или обыденного здравого смысла было попросту невозможно. Массовое применение рабского труда перестало гарантировать успех в этих областях деятельности. И Архимед, взяв в качестве точки опоры математические абстракции, сумел с помощью «рычага» теории перевернуть мир современной ему техники. «Конечной целью механики Архимеда было объяснение не мира вообще, а сравнительно ограниченного класса свойств тел и явлений, обнаруживаемых в процессе технической деятельности. Геометрические исследования свойств абстрактных фигур и тел не были для него самоцелью, как, по-видимому, для Евклида, – они были ориентированы на интересы практики и применение технического и естественного знания для решения научно-практических задач» [2, с. 14].

Разумеется, задолго до рождения Архимеда неизвестные изобретатели научились изготавливать и применять простейшие механизмы: рычаг, ворот, блок, винт, клин. Но принцип их действия, причины эффективности постигнуты не были. Чтобы объяснить, почему они работают, надо было выйти за пределы непосредственного опыта технической деятельности, проанализировать и обобщить данные. Архимед не только вывел из отдельных фактов систему научно-технического знания, но и блестяще применил ее к решению разнообразных инженерных задач.

Следует особо отметить, что одностороннее изучение античности в течение длительного времени привело к тому, что понятие «инженер» связывалось только с именем Архимеда и вместо собственно инженерной деятельности рассматривались ее результаты: рудники, мосты, отопительные системы, дороги, театры, туннели, гидротехнические сооружения. В большой степени недооценены успехи инженерной деятельности в области измерительных приборов, тонкой механической аппаратуры, а также «обыкновенной», но необходимой грузоподъемной техники. Несколько более известны те инженеры, труды которых о строительстве оборонительных сооружений дошли до потомков. Остальные сочинения имеются

только в фрагментах и все еще не опубликованы. Из этого письменного наследия явствует, что в эллинистическом государстве инженер занимал более почетное положение в обществе, чем прежде в полисе (государствах-городах). В Римской империи инженеры также пользовались уважением. Витрувий (2-я пол. I в. до н. э.), происходивший из бедной семьи, был приближенным императора Августа; Фронтин (ок. 40 – 103 г. н. э.) – римский наместник в Британии, верховный смотритель водоснабжения в Риме, принадлежал к сенатской аристократии.

Из императорского стипендиального фонда для обучения инженерному делу (правление Александра Севера, 200–235 гг. н. э., и Константина) оплачивались все расходы по обучению и содержанию математически одаренных юношей и мальчиков, в основном из небогатых семей. Диоклетиан (ок. 245 – 313 г. н. э.) содержал на государственном жалованьи преподавателей механики и архитектуры. Профессиональная гордость инженера прослеживается в надписях на многочисленных постройках и надгробиях начиная с IV в. до н. э. и по IV в. н. э.

Впоследствии эта деятельность пресекалась, инженерное знание было почти полностью забыто вплоть до эпохи Возрождения. Именно тогда пламя инженерной мысли разгорается в полную силу, предыстория инженерного дела завершается и начинается его история.

Переход от наглядно-эмпирического решения инженерно-технических проблем к научному, признание инженерного труда как профессии явились следствием принципиально нового способа общественной организации и разделения труда. Впрочем, рождение инженерной профессии стало результатом переворота во всех без исключения слоях и сферах общественной жизнедеятельности. Техника, способ производства, общественно-экономические отношения, политические институты, общественное сознание и психология, наука – все это необходимо было изменить, причем изменить самым решительным образом, прежде чем работа по решению инженерных проблем приобрела статус профессионального занятия в общественно значимых масштабах.

Каковы же основные факторы, способствовавшие вызреванию инженерного труда? Среди них можно назвать следующие:

1. Технологическая революция. Долгое время технологический способ производства, т. е. основной тип связи между человеком и техническими средствами труда, оставался неизменным. Разумеется, орудия совершенствовались, усложнялись, становились эффективнее, но в целом в системе «человек – техника» человек был представлен ручным трудом, техника – инструментами для этого труда. Шли годы, складываясь в десятилетия, века, и наконец пришел день, когда «гомотехнический автомат» – ремесленник, вооруженный ручными инструментами, – перестал быть эффективным, исчерпал свой потенциал. Ремесленное производство уже не поспевало за растущими потребностями общества: «Машинный труд как революционирующий элемент непосредственно вызывает к жизни превышением потребности над возможностью удовлетворить ее прежними средствами производства» [11, с. 41]. Последним титаническим усилием ремесленничества «удержаться на плаву» было создание мануфактур, где самостоятельного мастера и универсальное орудие заменили частичное орудие и частичный рабочий. Парадокс заключается в том, что мануфактура, характеризующаяся ручным трудом, в то же время представляла как бы «живой механизм», состоящий из цепочки рабочих, дополняющих работу друг друга, т. е. была прообразом механизма машинного.

Смысл перемен в системе «человек – техника», обусловленный становлением машинного производства, заключался в передаче технике ряда человеческих функций; машина возникает с того момента, когда орудия превращаются, по словам К. Маркса, «из орудий человеческого организма в орудия механического аппарата» [11, с. 41]. Перемещение функции непосредственного управления орудиями от человека к машине ознаменовало собой не просто техническую революцию – такие революции «местного значения» происходят в технике в связи с любым крупным изобретением. Нет, произошел полный переворот во всей технической системе, после которого она начала развиваться по-новому, на основании новых принципов, новых технических форм и структур. Иными

словами, возникновение машин определило начало нового исторического этапа в развитии техники – механизации производства.

Технологическая революция шла к победе медленно, но неотвратимо. Вначале бастионы ремесленничества пали в ведущей отрасли промышленности позднего Средневековья – ткачестве. Именно здесь возникли ткацкие станки – ремесленные машины, которые приводит в движение и которыми управляет один человек. Затем промышленная революция коснулась и других отраслей производства, получив в качестве подспорья универсальный тепловой двигатель – паровую машину. Развитие машиностроения, т. е. производства машин с помощью машин, определило победу крупной машинной индустрии. Постепенно были технически перевооружены промышленность, транспорт, связь, а затем и сельское хозяйство. В результате революции утвердился новый технологический способ производства.

Необходимость изобретать и применять в промышленных масштабах различного рода машины невольно породила потребность в специалистах, способных осуществлять эту деятельность не от случая к случаю, а постоянно. Таким образом, переворот в техническом компоненте производительных сил привел к видоизменению человеческого компонента – появились рабочие и инженеры.

2. Развитие общественно-экономических отношений. «Машинная революция», изменяя характер и содержание труда, его технологию, организацию и структуру, способствует изменению производственных отношений. Вместе с происшедшей однажды революцией в производительных силах, которая выступает как революция технологическая, совершается также и революция в производственных отношениях. Система машин, сменяющая примитивную ручную технику ремесленничества, открывает простор для утверждения капиталистических отношений. Укрепление зародившейся в недрах феодализма капиталистической формы собственности, превращение ее в господствующую неразрывно связано с крупной машинной индустрией, преобразованием производства на новых, рациональных началах.

Одновременно с положительным моментом – повышением производительности общественного труда – капитализм, развивающийся на своей собственной материально-технической базе, демонстрирует все свои мрачные стороны: рабочий становится придатком машины, завершается разделение участвующих в производстве групп на «чистых» и «нечистых». Инженер, появляясь в результате такого разделения труда, принимает на себя умственные функции сотен ограбленных в творческом отношении рабочих. Как представитель определенной социальной группы, он призван охранять и приумножать интересы правящего класса, подчиняя им всю производительную мощь общественных сил труда, заставляя служить капиталу открытые наукой законы природы.

Итак, место инженера в исторически определенной системе общественного производства – это одновременно его принадлежность и к определенной профессии, и к определенной социальной группе. Становление деятельности в социально институциональном виде происходит одновременно со становлением буржуазии, т. е. одновременно со становлением капитализма.

3. Переворот в мировоззрении, становление личности. Консерватизм средневекового мышления, усугубляемый догматическим религиозным мировоззрением, долгое время сдерживал развитие инженерной мысли. Изменять, «конструировать» мир в соответствии с заранее намеченными целями, личной волей вправе был только бог. Посягательство на творческую функцию бога, попытки усовершенствовать созданное им воспринимались с точки зрения религиозного фанатизма как ересь, грех. В христианском монотеизме беспредельно возносилась изобретательская деятельность бога и бесконечно принижался, даже отвергался человек, если он занимался этой деятельностью. Такое положение сохранялось довольно долго. Целый ряд изобретений (например, магнитная стрелка компаса) веками не использовался или использовался тайно, с опаской ввиду их «дьявольской природы». Господство средневековой парадигмы неприятия нового было низвергнуто лишь в эпоху Ренессанса. Замена бога-творца человеком-творцом, первоначально произошедшая в сфере художественного мышления, распространилась

постепенно и на техническое творчество. Человек понемногу перестает воспринимать изобретательство как божественную прерогативу, становится, по выражению Леонардо да Винчи, «свободен в изобретениях». Показательны в этом отношении изменения, характерные для научно-технических трудов времен Ренессанса и отличающие их от средневековых технических энциклопедий-сборников рецептов. В этих трудах даны не только предписания и последовательность действий, чтобы получить искомый результат (изделие, материал), но и предприняты попытки ответить на вопрос, почему надо поступать именно так. Пусть с содержательной стороны эти объяснения не выдерживают никакой критики, но появление их свидетельствует о переходе от механического, слепого копирования к целенаправленному изучению и использованию свойств природы, о повороте в мировоззрении и мышлении от веры к познанию.

Становлению инженерного творчества предшествовало также становление личности как индивидуального субъекта этого творчества. В Средние века личности инженера в современном смысле слова, собственно говоря, не существовало; не только в труде, но и во всех без исключения сферах жизнедеятельности ремесленник был неотделим от цеховой общины. Индивидуальное «Я» почти без остатка растворялось в коллективной психологии, и автором технического нововведения выступал не отдельный человек, а коллективная личность-мастерская, личность-цех. До тех пор, пока человек не умел и не мог осмыслить грань, отделяющую его от товарищей по мастерской, цеховой корпорации, ремеслу, он не в состоянии был нарушить технические традиции, целенаправленно создавать новое в технике. И лишь эпоха буржуазных отношений, освободившая сознание людей от многовекового груза феодальных, религиозных, цеховых традиций, рождает обособленно от других, суверенного индивида, способного стать творцом.

4. Перемены в науке. XVI–XVII вв. – это время, когда свежий ветер естественно-научного познания врывается в затхлую атмосферу умозрительной науки. Изобретательская деятельность Леонардо да Винчи, открытия Ф. Бэкона и Галилея вооружают умы

идеями грандиозных прикладных возможностей применения научного знания. И эта идея оказалась на удивление созвучной духу времени. «Рождающееся буржуазное общество с его деятельным, энергичным, предприимчивым характером, с его практицизмом обнаружило в возникающем опытным естествознании глубоко родственные черты. Общество, которое центром притяжения своих интересов сделало предпринимательский поиск... такое общество, естественно, толкало науку в сторону практической, материально-производственной, технической ориентации, к превращению ее в действенного агента производства» [11, с. 12].

Нужды растущего машинного производства, мореплавания, торговли положили начало союзу научной и технической изобретательской деятельности. Динамичное развитие крупной промышленности, формируя специальную потребность в решении сложных технических задач, создает условия для практического применения данных науки. «В качестве машины средство труда приобретает такую материальную форму существования, которая обуславливает замену человеческой силы силами природы и эмпирических рутинных приемов – сознательным применением естествознания». Изменение ориентации науки на производственные проблемы сказалось на ее развитии самым живительным образом.

В XVII–XVIII вв. наука становится профессиональным занятием для достаточно многочисленной группы лиц; возникают первые академии и научные общества – в Италии (1600), Англии (1660), во Франции (1668), Германии (1700), России (1725). Решающим фактором расцвета науки выступает именно связь с производством, технические потребности которого продвинули науку вперед больше, чем десяток университетов. Активно развиваясь, наука, в свою очередь, становится фактором процесса производства. Слияние науки и техники как раз и определяет содержание инженерного труда, его основную функцию: создание средств и способов технической деятельности на основе научных достижений.

5. Создание средств инженерного труда. На ранних, доинженерных стадиях технической деятельности «генетический код» (т. е. исторически сложившиеся формы и методы) конструирования

передавался от поколения к поколению в виде опыта участия в работе или через готовые изделия. И тот, и другой способ был малоэффективен. Не удовлетворяло практику и составление письменных сборников технико-технологических рецептов, ибо словесное описание технической идеи громоздко и маловыразительно. В XVI–XVII вв. в техническом деле начинают широко использоваться наброски и рисунки для изображения деталей, узлов, конструкций. Период перехода от ремесленного производства к машинному характеризуется еще более бурным развитием графических методов передачи технической информации. Одновременно с искусством черчения создаются и точные чертежные приборы, и инструменты, ведутся теоретические изыскания в этой области. В 1798 г. Гаспар Монж опубликовал книгу «Начертательная геометрия», в которой систематизировал приемы изображения технического объекта в виде проекций на две взаимоперпендикулярные плоскости. В результате Его Величество Чертеж прочно воцарился в технике. Инженерное дело получило свой особый язык – средство инженерного труда.

Следует заметить, что историческая логика развертывания общественного разделения труда вкупе с целым набором технических, экономических, социальных и психологических факторов привели к обособлению инженерной деятельности от прочих видов умственного труда. Возникла новая профессия, смысл которой заключался (и заключается по сей день) в применении научных знаний при решении технических проблем производства.

Сущность инженерной деятельности находит свое отображение в функциях такой деятельности. Состав и последовательность выполнения функций инженерной деятельности, надо признать, незначительно изменились с той поры, как инженерный труд обрел статус профессии. Но содержание их многократно усложнилось. Если когда-то инженер мог в одиночку «пробежать дистанцию» от технической идеи до ее промышленного применения, то теперь этот путь, ставший поистине сверхмарафонским, по силам лишь целой «команде» специалистов, передающих эстафету с этапа на этап.

Первым внутривидовым разделением функций инженерного труда стало обособление друг от друга тех, кто придумывал и конструировал технику, и тех, кто налаживал ее выпуск на заводах. Но на этом процесс специализации в среде инженерно-технических работников не остановился, и два первоначальных крупных блока внешних и внутренних функций раздробились к настоящему времени на ряд более мелких.

К в н е ш н и м ф у н к ц и я м (или социальным) относятся гуманистическая, социально-экономическая, управленческая, воспитательная и функция развития технического базиса общества.

К в н у т р е н н и м и л и т е х н и ч е с к и м ф у н к ц и я м относятся такие, как функции анализа и технического прогнозирования, исследовательских разработок, конструирования, проектирования, технологического обеспечения, регулирования производства, эксплуатации и ремонта оборудования, т. е. группа функций, обеспечивающих развитие производства и его функционирование. Для того чтобы представители разных инженерных специальностей сумели, в отличие от строителей Вавилонской башни, найти общий язык, потребовалось координировать их действия, плотно состыковать приобретшие автономию инженерные функции. В связи с этим возникает еще одна, особая функция – системное проектирование.

Все функциональные элементы структуры инженерной деятельности необходимы. Однако они не расположены по значению, а этапы деятельности, связанные с их реализацией, различаются по трудоемкости. Отсюда и различия в численности инженерных специалистов того или иного профиля. А сравнительно малочисленная группа инженеров-системотехников или аналитиков порождает сомнения в том, что они вправе занимать отдельные места в структуре инженерной профессии. Кроме того, осложняют «переложение» структуры инженерной деятельности на профессиональную структуру неспецифические функции (организационно-управленческая, рационализаторская и изобретательская), которые осуществляются сразу в нескольких видах инженерного труда. Но все же основная масса инженерных функций достаточно жестко разгра-

ничена и закреплена за определенными специальностями. Проследим эту зависимость.

Функция анализа и технического прогнозирования. Ее выполнение связано с выяснением технических противоречий и потребностей производства. Здесь определяются тенденции и перспективы технического развития, курс технической политики и соответственно намечаются основные параметры инженерной задачи. Короче говоря, формулируется в первом приближении ответ на вопрос, что нужно производству завтра. Осуществляют эту функцию инженерные «зубры» – руководители, ведущие специалисты научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, бюро, лабораторий, объединяясь в «коллективный мозг» – ученый или научно-технический совет.

Исследовательская функция инженерной деятельности состоит в поиске принципиальной схемы технического устройства или технологического процесса. Инженер-исследователь обязан по роду своей деятельности найти способ «вписать» намеченную к разработке задачу в рамки законов естественных и технических наук, т. е. определить направление, которое приведет к поставленной цели.

Конструкторская функция дополняет и развивает исследовательскую, а порой и сливается с ней. Особенное ее содержание заключается в том, что голый скелет принципиальной схемы прибора, механизма обрастает мышцами технических средств, технический замысел получает определенную форму. Инженер-конструктор берет за основу общий принцип работы прибора – результат усилий исследователя – и «переводит» его на язык чертежей, создавая технический, а затем и рабочий проект. Из совокупности известных технических элементов создается такая комбинация, которая обладает новыми функциональными свойствами, качественно отличается от всех прочих.

Функция проектирования – родная сестра двух предыдущих функций. Специфика ее содержания заключается, во-первых, в том, что инженер-проектировщик конструирует не отдельное устройство или прибор, а целую техническую систему, используя при этом в качестве «деталей» созданные конструкторами агрегаты

и механизмы; во-вторых, в том, что при разработке проекта часто приходится учитывать не только технические, но и социальные, эргономические и другие параметры объекта, т. е. выходить за рамки сугубо инженерных проблем. Труд проектировщика завершает период инженерной подготовки производства; техническая идея приобретает свою окончательную форму в виде чертежей рабочего проекта.

Технологическая функция связана с выполнением второй части инженерной задачи: как изготовить то, что изобретено? Инженер-технолог должен соединить технические процессы с трудовыми и сделать это таким образом, чтобы в результате взаимодействия людей и техники затраты времени и материалов были минимальны, а техническая система работала продуктивно. Успех или неуспех технолога определяет ценность всего инженерного труда, затраченного перед этим на создание технического объекта в идеальной форме.

Функция регулирования производства. Проектировщик, конструктор и технолог совместными усилиями определили, что и как делать, осталось самое простое и одновременно самое сложное – сделать. Это задача рабочего, но направить его усилия, непосредственно на месте организовать его труд с трудом других и подчинить совместную деятельность работников решению конкретной технической задачи – дело инженера-производственника, производителя работ.

Функция эксплуатации и ремонта оборудования. Здесь название говорит само за себя. Современная сверхсложная техника во многих случаях требует инженерной подготовки обслуживающего ее работника. На плечи инженера-эксплуатационника ложится отладка и техническое обслуживание машин, автоматов, технологических линий, контроль за режимом их работы. Все чаще инженер нужен за пультом оператора.

Функция системного проектирования сравнительно нова для инженерной деятельности, но по значимости превосходит многие другие функции. Смысл ее в том, чтобы всему циклу инженерных действий придать единую направленность, комплексный

характер. Возникает новая профессия инженера-системотехника (или инженера-универсалиста), призванного давать экспертные оценки в процессе создания сложных технических и особенно «человеко-машинных» систем, где необходим их постоянный диагностический анализ, направленный на раскрытие резервных и узких мест, выработку решений с целью устранения обнаруженных недостатков. Эксперты-универсалисты должны помочь руководителю достичь согласия по всей программе работ, включающей разные проекты.

Развитие инженерной деятельности после появления инженера протекало необычно стремительно. Союз науки и техники породил лавину технических и общественных перемен, которая по мере движения вперед захватывала все более широкие пласты жизни общества. В отношении инженерной профессии действие научно-технической революции оказалось воистину всеобъемлющим. Прогресс инженерии в XIX и особенно в XX столетии стал подобен разливу полноводной могучей реки, разветвляющейся к тому же на десятки и сотни новых потоков.

Исследование истории каждого из них становится поистине необъятной задачей, поскольку пришлось бы оценивать технический уровень той или иной страны, особенности отрасли производства, уровень научных разработок и многие десятки иных факторов, находящихся во взаимосвязи друг с другом. Поэтому назовем лишь самые общие, коренные изменения, произошедшие в инженерном деле и приведшие его к небывалому прежде расцвету. В сфере технической – это овладение новыми источниками энергии и создание новых материалов; в области социальной – превращение инженерной специальности в одну из самых массовых, а также те перемены в общественной сущности инженерного труда, которые связаны с установлением нового способа производства; в области научной – прогресс инженерии опирается на становление и развитие технических наук.

Перечисленные явления относятся не только к прошлому, но и к настоящему инженерного дела; история здесь тесно переплетается с современностью.

2.2. Появление знаний в области механики

С далеких времен, еще в дописьменные времена, человек мог пользоваться рычагом и клином, приспособлениями, без помощи которых нельзя было изготовить никакие орудия. Кстати, следует сказать, что и орудия эти в сущности также представляли либо комбинации рычага и клина, либо их варианты.

В процессе обработки каменного орудия люди пользовались скалыванием и трением, а позже, уже после освоения бронзы (с V тыс. до н. э.), познакомились с результатами операции сплющивания и узнали, что под влиянием удара можно изменить форму орудия и придать ему желательный вид. Наблюдения за полетом камня или палки, брошенных в нужном направлении, приводят к осознанию зависимости дальности полета от силы броска: с этим связаны изобретения пращи и лука со стрелами.

В конструкции стрелы и метательного копья (дротика) уже заложено неявное понятие об устойчивости движения, а в булаве и боевом топоре – оценка значения силы удара.

Племенам, стоящим на очень низкой ступени развития, принадлежит изобретение такого орудия, как бумеранг, сущность которого заключается в соединении силы удара с весьма сложной, наперед заданной траекторией полета.

Очень древними являются зернотерки – возвратно-поступательное движение одного камня относительно другого. Значительно позже появляется зерновая мельница, в которой используется вращательное движение камня: соответствующее механическое приспособление уже в исторические времена V–III вв. до н. э. развивается в водяную мельницу – первую машину в мировой истории. Овладение вращательным движением шло, по-видимому, следующим путем: вращение деревянной палочки для получения огня, изобретение гончарного круга, использование круглого бревна при перевозке тяжестей, изобретение колеса, изобретение подъемных приспособлений, блока и ворота.

На протяжении многих тысячелетий охотничьи племена изобретали ловушки для поимки диких зверей, многие из которых

представляли собой сложные кинематические цепи, срабатывающие при нажиме на одно из звеньев. Действие токарного станка, изобретение которого теряется в глубине веков, как и изобретение прялки, также основано на понимании и использовании движения.

Явления природы – движение светил и их действительное или кажущееся влияние на судьбы людей, течение воды в реке и его использование для движения плота, прилив и отлив на море, ветер и буря, гром и молния, дождь и засуха – заставляли древнего человека задумываться об их первопричине, чтобы избежать беды или заставить помогать себе. Стремление осознать явления природы и чувство собственного бессилия перед ними привели соответственно к становлению науки и мифотворчеству.

С появлением государств начинается государственно-культурное строительство. Всеобщей известностью пользуются египетские пирамиды, но сооружения подобного типа были и на Крите, в Греции, Сирии, Мексике и во многих других местах. Для всех них характерна доставка издалека камней большого веса, их заготовка, укладка. Древние строители, по-видимому, были знакомы лишь с рычагом, клином и наклонной плоскостью, но пользовались этими приспособлениями сознательно: можно предполагать, что они уже владели зачатками механики.

К этому же времени относится появление первых водоподъемных приспособлений: ворота, на барабан которого был намотан канат, несущий сосуд для воды, а также журавля – древнейшего предка кранов и большинства подъемных приспособлений и машин. Ворота представляет собой дальнейшее развитие блока. Значительно позже была изобретена нория – прообраз современного элеватора.

Итак, к началу последнего тысячелетия до нашей эры народам, населявшим страны Средиземноморского бассейна, были достаточно хорошо знакомы те пять простейших подъемных приспособлений, которые впоследствии получили название простых машин. Приспособления эти сравнивали друг с другом, выбирали наиболее подходящие, комбинировали их соответствующим образом. Начинается рассуждение – первоначальный научный процесс: приспособление раскрывается в отвлечении от его конкретной характеристики.

В сущности, элементы рассуждения у человека были уже тогда, когда он взял в руки камень: различное применение камня и каменного орудия в эпоху палеолита означает, что ум первобытного человека уже обладал возможностью абстрагироваться от несущественных, частных особенностей орудия. Процесс этот был медленным и длился десятки тысячелетий. В эпоху неолита он заметно ускорился, и, наконец, ко времени перехода от обработки бронзы к обработке железа этот процесс обуславливает становление науки.

Как известно, основы современной науки или, точнее, по своим признакам приближающиеся к современной науке, заложили греки (VI в. до н. э.). Но осуществили это они не на пустом месте. Поколения людей буквально по крохам собирали в памяти ценное из опыта отцов и дедов и передавали его своим детям и внукам. Но в первобытном обществе не было места для мыслителей: все должны были трудиться, и труд первобытного человека, его борьба за существование были нелегкими. В классовом же обществе некоторые его члены-жрецы, чиновники, учителя, не говоря уже о тех, в руках которых была сосредоточена власть, получили возможность не участвовать в физическом труде: у них оказалось время, свободное для размышлений.

Наука в древнейших рабовладельческих государствах зародилась сначала как система сокровенных и таинственных сведений, доступных лишь посвященным, а затем и как профессиональное занятие, как средство зарабатывать себе на жизнь. Первыми учеными-профессионалами были философы, и под философией понималась вся совокупность знаний о человеке, о вещах, его окружающих, о природе и космосе. Первые познания греки заимствовали от египтян и из Месопотамии: недаром первые греческие философы происходили из Малой Азии.

Необходимым условием становления науки оказалось изобретение письменности. Известно, что в Египте и Месопотамии, а возможно, и в других странах восточной части Средиземноморья уже записывались сведения из области наук, таких как математика, астрономия, медицина, механика, и псевдонаук: астрологии, магии.

Человеческая память таким образом была освобождена от тяжелого груза знаний, что положительно повлияло на возможность их дальнейшего развития. Вместе с тем не все думали так. Даже значительно позже, после появления письменности, греческий философ Сократ (469–399 гг. до н. э.) возражал против распространения письменности, указывая на ее опасность, «ибо это изобретение порождает забывчивость в умах тех, кто овладевает им, понуждая их пренебречь своей памятью. Уверовав в силу письма, они будут вспоминать с помощью посторонних знаков, не пользуясь тем даром, который в них заложен» [2, с. 21].

И теоретические «знания», и знания с практическим содержанием имеют чрезвычайно древнее происхождение. Только первые с изобретением письменности начали фиксироваться на свитках папируса, на камне или на глине, а прикладные – в большинстве случаев остались в устной традиции и записывались лишь изредка. И если теоретические знания, выражавшиеся сначала в рецептурной форме, мало-помалу вырабатывали свой собственный, «научный», способ изложения, то прикладные еще долгие столетия будут придерживаться «рецептуры».

Какие познания из области механики были у древних народов до начала VI в. до н. э.? Это были элементы гидравлики, строительной механики, статики, динамики и небесной механики.

Практическая гидравлика – управление разливом рек, орошение полей при помощи каналов, учет распределяемой воды, первые водоподъемные приспособления – была в основе хозяйственной жизни древнейших культурных стран, поскольку их благоденствие в значительной степени зависело от умения вести водное хозяйство.

Орошаемое земледелие увеличивало возможности роста населения и появления городов. Первые города и необходимость снабжения их водой дали новые темы для размышления древним гидравликам: так, в III в. до н. э. г. Мохенджо-Даро на берегу Инда (современный Пакистан) имел водопровод и прекрасную канализационную систему для отвода дождевой воды со специальными колодцами для стока нечистот. Познания в области строительной

механики обуславливались необходимостью постройки крепостей, культовых и жилых зданий: требовалось критическое отношение не только к возводимым конструкциям, но и к материалам.

В результате многовекового опыта была осмыслена разница в прочности камня, кирпича-сырца и обожженного кирпича, была найдена правильная форма высокого сооружения: в начале III тыс. до н. э. гениальный египетский архитектор Имхотеп создал в Соккаре первую ступенчатую пирамиду.

Древнейшие познания в области динамики связаны с практической механикой охоты и войн. Полет стрелы, полет камня, брошенного пращей, «артиллерийские» орудия – катапульты для метания камней большого веса, баллисты и т. п. побуждали древних механиков задумываться над полетом «снаряда»: он должен был попасть в цель. Имели они некоторые сведения и об относительной упругости материалов: тетива лука и упругие элементы баллист изготавливались из жил животных, обработанных специальным образом.

Этим не исчерпывались познания древних. Уже египтяне умели управлять силой ветра: паруса их судов постепенно принимают наилучшую форму.

Все эти элементы практической механики послужили базой при становлении механики как науки. Первый из философов, о котором имеются исторические сведения, Фалес, живший в Милете (Малая Азия) в начале VI в. до н. э., был, как сообщает историк Геродот, военным инженером и гидротехником. Он познакомил греков с египетской и вавилонской наукой, в его философии есть элементы рассуждения о сущности движения.

Гераклит Эфесский жил в Малой Азии в начале V в. до н. э. Он утверждал, что в природе нет ничего постоянного и неизменного: все течет, и нам только кажется, что всякий раз мы погружаемся в одну и ту же реку, а на самом деле вода, в которую мы раньше погружались, давно ушла. Нельзя дважды войти в одну и ту же реку. Мир, единый из всего, не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим, считал он.

Следует заметить, что уже в древние времена попытки пояснить движение и его элементы подвергались критике. Так, Зенон Элейский (510–440 гг. до н. э.) оспорил понятия протяженности и множественности вещей.

Значительно развил учение о движении величайший из греческих материалистов Демокрит (ок. 470 г. – нач. IV в. до н. э.), уроженец малоазиатского города Абдер. Он учил, что материал состоит из атомов, неделимых мельчайших частиц, имеющих разную величину и форму. Атомы движутся в пустоте в различных направлениях и с различными скоростями, но не ускоряясь и не замедляясь, и, следовательно, не останавливаясь. Движение атомов извечно, оно не имеет ни начала, ни конца. Таким образом, Демокрит предвосхитил закон инерции; различие было лишь в том, что он допускал не только прямолинейное, но и круговое движение атомов. Однородные атомы могут влиять друг на друга, притягиваясь или отталкиваясь, но вступать в соприкосновение они не могут. Поэтому толчок, удар, давление являются лишь кажущимися явлениями, обманом наших органов чувств. Движение универсально. Труд Демокрита по механике сохранился лишь во фрагментах, причем в основном содержащих возражения противников философа.

Значительно более полную концепцию механики мы находим в работах великого древнегреческого философа Аристотеля (384–322 гг. до н. э.) – «Физика», «Трактат о небе». Аристотель, занимаясь проблемой движений, в это понятие включал, собственно, не только перемену места, но и качественные изменения. Вместе с тем наука Аристотеля основана не на опыте, а на рассуждении. Он различал естественные и насильственные движения. Движение тела под воздействием силы тяжести считал естественным, ибо в этом случае тело стремится к своему естественному месту. Движение же камня под действием силы, приложенной к нему, есть движение насильственное. Подъем легких тел вверх является примером естественного движения, ибо их местоположение – на орбите Луны, а естественное местоположение тяжелых тел – в центре Вселенной.

Понятия силы, или мощности (оно окончательно прояснится лишь через две с лишним тысячи лет), у Аристотеля выступает в качестве первопричины движения. Он знает сложение движений по правилу параллелограмма, известны ему понятия скорости и сопротивления среды. Движение он считает вечным, но свойство движения не присуще материи: оно постоянно поддерживается двигателем, и существует первичный двигатель, который является первопричиной движения.

Таким образом, у Аристотеля мы встречаемся не только с причинами и сущностью движения, но и с некоторыми кинематическими и динамическими характеристиками его. Само по себе кинематическое исследование – донаучного происхождения. Первые же наблюдения небесных тел показали, что существуют неподвижные и подвижные тела; изучение этих тел и их видимых движений и легло в основу астрономии и астрологии (в древности они не различались), эти первоначальные наблюдения послужили также одной из первопричин становления науки механики. Первым сочинением (из числа дошедших до нас), в котором было пояснено равновесие тел и которое, таким образом, явилось основополагающим при создании статики, считается трактат «Механические проблемы», приписанный Аристотелю, но созданный в начале III в. до н. э., т. е. после его смерти, вероятно, одним из его последователей. В этом сочинении автор, так называемый Псевдоаристотель, исследует простые машины на основании одного принципа, утверждая, что свойства весов приводятся к свойствам круга, свойства рычага – к свойствам весов, а большинство движений механизмов приводится к свойствам рычага, мощность, или силу, он определяет как произведение веса, или массы тела (древние не различали этих понятий), на скорость движения.

Здесь чувствуется влияние Аристотеля, но интерес автора к механическим искусствам заставляет предположить, что он был жителем Александрии, где к III в. до н. э. техника достигла высокого совершенства. Ему принадлежит интересная мысль: «...когда нам приходится делать что-нибудь противоположное стремлению природы, задача становится трудной и требует применения техниче-

кого искусства. Ту часть этого искусства, которая борется с этими затруднениями, мы называем механикой» [2, с. 32].

На протяжении V–VI вв. механическая техника пополняется еще одним изобретением – возникают машины. Первые машины – простейшие водяные мукомольные мельницы – были построены на горных речках Закавказья и Малой Азии. Возникновение мельниц было обусловлено ростом населения и увеличением спроса на муку. Помол зерна, производившийся вручную на зернотерках и ручных жерновах, был одной из самых трудоемких и тяжелых операций того времени.

Водяная мельница (рассматриваемая как машина) имела в своем составе энергетический агрегат – водяное колесо, передачу – два цевочных колеса, жестко насаженных на валы, и рабочий орган – жернова. В таком виде, с незначительными улучшениями, водяная мельница дожила до XVIII, а кое-где и до XIX в.

Второе поле деятельности, ставшее основой для возникновения машин, было обусловлено нуждами войны и обороны. Первоначально простейшие приспособления для метания стрел и камней с течением времени развиваются в довольно сложные военные машины. Древнейшая из них – баллиста – состояла из деревянной рамы и жестко связанных с нею стоек, с которыми были скреплены два пучка скрученных сухожилий. Камень весом 30 кг, брошенный баллистой, пролетал свыше 400 м. В III в. до н. э. баллисты в разных вариантах были распространены по всему культурному Средиземноморью.

Заметный след в механике оставил Архимед (287–212 гг. до н. э.). Не все его работы дошли до нас, но и то, что сохранилось, является громадным вкладом в сокровищницу человеческой культуры. Он занимался арифметикой и геометрией, вплотную подошел к созданию интегрального исчисления, чем опередил свой век на два тысячелетия, многое сделал в механике. Он выяснил принцип центра тяжести, создал строгую систему статики, заложил основы гидростатики. В области практической механики он сделал много изобретений, в том числе планетарий – прибор, показывающий движение небесных светил, усовершенствовал зубчатые колеса, изобрел

винт, на принципе винта построил водоподъемное приспособление («архимедов винт»), применив его впервые для осушки долины, залитой Нилом. Им было создано много машин, в том числе военных. Кстати, «сам Архимед, – пишет о нем Плутарх, – считал сооружение машин занятием, не заслуживающим ни трудов, ни внимания...» [2, с. 42].

Знаменитому и многими любимому искусству построения механических орудий положили начало Эвдокс и Архит, стремившиеся «... разрешить те вопросы, доказательство которых посредством одних лишь рассуждений и чертежей затруднительно...» [2, с. 42].

В результате завоеваний Александра Македонского (356–323 гг. до н. э.) образовалась огромная империя, где греческий язык стал государственным, возникает культура, получившая название эллинистической (от слова *Ellas* – Греция). Главным центром эллинистической культуры стала Александрия, новая столица Египта. Механика эпохи эллинизма развивается в основном в прикладном направлении: бурное строительство потребовало создания новых, более мощных строительных машин и более пристального внимания к оценке прочности архитектурных конструкций. Развиваются практическая гидравлика и пневматика, создаются новые механические приспособления, новые военные машины. Наследники Александра Македонского ведут междоусобные войны. В этой связи особое внимание обращается на строительство укреплений, прочность стен. Самым крупным зданием в Афинах становится Арсенал, в котором были собраны военные машины и корабельное вооружение.

Возрастание роли механики заставило изменить отношение к этой профессии. Механикой «по совместительству» начинают заниматься архитекторы и военные инженеры. Высокого развития достигла военная техника в Александрии, где Птолемеи, правившие Египтом, тратили большие средства на сооружение боевых машин. В середине III в. до н. э. в Александрии учился Филон Византийский, который написал «Свод механики» – одно из первых сочинений по практической механике. Свод состоял из девяти книг (до нас дошли лишь четвертая и пятая): 1) Общие принципы механики; 2) Учение о рычагах; 3) О постройке гаваней; 4) О построении

метательных машин; 5) Пневматика; 6) О построении автоматов; 7) Военное снаряжение; 8) О фортификации и осаде городов; 9) Тактика. Этот перечень свидетельствует о многообразии направлений в развитии механики, многообразии практических интересов.

Из александрийских механиков наибольшую известность получили Ктесибий и Герон. Ктесибий (II–I вв. до н. э.) был, по-видимому, самоучкой. Основные интересы его лежали в области гидравлики и пневматики; он изобрел поршневой насос, счетчик оборотов, занимался устройствами с применением сжатого воздуха. Герон Александрийский (ок. I в. до н. э.) написал едва ли не больше всех античных ученых по вопросам механики. Его перу принадлежали «Механика», «Книга о подъемных механизмах», «Пневматика», «Книга о военных машинах», «Театр автоматов» и ряд других. До нас дошли лишь немногие из его сочинений. Кстати, личность Герона не выяснена до настоящего времени. Существует мнение, что он был учеником Ктесибия, некоторые авторы думают, что Герон жил не в I в. до н. э., а на 100 лет позже – в первом столетии нашей эры.

В «Механике» Герон изучает простые машины и их комбинации. При этом он пользуется понятием момента, но неизвестно, принадлежит ли ему открытие этого понятия или он заимствовал его у других ученых. Кроме простых машин, он описывает также и некоторые механизмы: систему зубчатых колес, системы блоков, полиспасты. Ему известно влияние силы трения, и он рекомендует при работе со сложными механизмами несколько увеличивать прилагаемые к машинам силы по сравнению с расчетными. Однако численно силу трения он не определяет.

К наиболее известным изобретениям, описанным Героном, относится эолипил – прообраз паровой турбины, в котором впервые для вращения используется реактивное действие струи пара; «геронов шар» – пневмогидравлический прибор, основанный на действии сжатого воздуха на поверхность воды; еще один пневмогидравлический прибор – «геронов фонтан». Из героновых «Пневматики» и «Театра автоматов» видно, что гидравлика и пневматика в эпоху эллинизма достигли высокой степени развития. Еще, как

видим, в древности знали уже многое из механики: ведь для сооружения даже самых элементарных автоматов надо хорошо знать статику простых машин, разбираться в механизмах и их частях, уметь производить вычисления, знать отношения и пропорции, т. е. применять знания всех отделов механики. Нужно было хорошо разбираться в гидравлике и пневматике, знать свойства сжатого воздуха и пара, а также уметь работать с упругими и гибкими телами, иметь большую инженерную выдумку и развитое пространственное воображение.

Творчество великих александрийских механиков было в основном направлено на постройку военных машин, водоподъемной техники, на сооружение малых автоматов, где они достигли большого совершенства. Они применяли и знали механизмы, изобретенные и распространившиеся значительно позже. В частности, Филон применял в своих приборах так называемый «карданов шарнир». Занимались они также механикой – геометрией и другими отделами математики: для них характерной была связь теории и практики.

Последним известным механиком александрийской школы был Папп Александрийский (III в. н. э.). В «Математическом собрании» Паппа механике посвящена восьмая книга. Папп называет механику наукой о материи и о природе элементов мира и указывает, что она изучает положение и тяжесть тел, движение их в пространстве, причины естественных и насильственных движений. Он различает теоретическую и практическую механику. К первой он относит результаты, связанные с арифметикой, геометрией, физикой и астрономией; практическая же механика изучает обработку меди, железа, дерева, строительное дело, живопись и прочие ремесла. Затем он описывает различные механические искусства: военные машины, строительные машины, автоматы и иные механические приспособления.

Учение о центре тяжести Папп излагает по Архимеду и Герону, а также описывает собственные исследования. Особое внимание он уделяет подъему тел по наклонной плоскости и передаче движения зубчатыми колесами. В частности, доказывает, что скорости вращения двух колес, находящихся в зацеплении, обратно пропор-

циональны числам зубьев и что числа зубьев соотносятся как диаметры колес. Он решает также задачу об определении диаметра колеса по числу его зубьев и по диаметру и числу зубьев другого колеса, находящегося в зацеплении с ним.

Можно сказать, что механика в Древней Греции достигла высокого уровня развития. Так, в частности, гидравлика развивалась так успешно, что уже в XIV в. до н. э. на территории Греции строились публичные бани с водопроводом, сложной системой канализации. К 600 г. до н. э. относится первая попытка прорыть канал на Коринфском перешейке, в конце VI в. до н. э. был построен водопровод в Афинах, в V в. до н. э. был сооружен канал, соединивший Нил с Красным морем, во II в. до н. э. построен водопровод в Антиохии, Пергаме.

К механике эпохи эллинизма примыкает механика Рима и Карфагена. Достаточно подробные сведения об уровне римской механики можно получить из сочинения «Об архитектуре» Марка Витрувия, архитектора эпохи Августа (I в. до н. э.).

Так, книга X этого трактата посвящена описанию машин и механических приспособлений и их действию. Почти половина X книги трактата (главы 10–16) посвящена описанию военных машин и прочей военной техники. К этому времени военные машины достигли большого совершенства и разнообразия. Как правило, они работали за счет энергии, накапливаемой при закручивании упругого элемента, в качестве которого применялись сухожилия животных или волос (большой частью женский).

Баллисты, катапульты, палинтоны применялись для метания камней, бревен, стрел. Создавались эти машины в большом количестве, и конструкции их были разработаны весьма тщательно. В качестве основания для расчета брались толщина пучка жил, называемая модулем катапульты, или вес снаряда. Например, катапульта «в один талант» (талант – около 26 кг) метала снаряд весом 1 талант; длина его равнялась 7,6 м, высота – около 7 м. При обороне Сиракуз Архимед строил катапульты «в три таланта», которые метали камни «на одну стадию» – около 185 м.

Строили и иной конструкции машины – онагры, скорпионы (метали стрелы). Так, Дионисий Александрийский построил полибол, в котором к скорпиону было добавлено приспособление для быстрой подачи стрел – античный пулемет. Ктесибью принадлежало изобретение аэротона – военной машины, в которой роль упругого элемента играл сжатый воздух.

Количество машин, которым располагали воинские части, иногда бывало весьма значительным. Так, при взятии Карфагена в руки римлян попало 476 тяжелых орудий и 2 500 скорпионов.

Значительные познания в механике, а именно в практической, имели также античные архитекторы. На основании длительного опыта, совершенствовавшегося на протяжении многих поколений, они выработали ряд эмпирических правил, которыми и пользовались в своей практической деятельности. Интересно, что индусские храмы, египетские пирамиды, вавилонский Сикуррат и греческие колонны всегда суживаются кверху, как это положено для сооружений, материал которых работает на сжатие.

Многие из сооружений того времени (особенно египетскиеobelisks) опрокинуты и разрушены человеческою злобою, но ни один не опрокинут бурей и до сих пор стоят – так отмечают ученые. Примечательно, что египетские и греческие колонны строились высотой не более девяти диаметров. Современные специалисты знают, что за этим пределом начинается опасность продольного изгиба. Древние архитекторы соблюдали эти условия (видимо, знали). Хорошо была освоена и механика постройки античных кораблей, которые иногда достигали солидных размеров (греческий корабль «Александрия») (264 г. до н. э.) длиной 125 м, приводился в движение двумя тысячами гребцов, скорость около 7,4 км/ч), причем греческие и египетские корабли отличались по конструкции.

Многие сочинения по механике не дошли до нас. Часто встречаются сочинения, не имеющие имени автора. Иногда они переписывались без указания автора. Ясно одно, что знания в области механики имеют древнее происхождение. Развитие познаний в области механики обуславливалось необходимостью решать задачи строительства зданий, устройства военных машин, объяснять различные виды движений и многим другим.

В IV в. Римская империя разделилась на Восточную со столицей в Византии и Западную – со столицей в Риме. В 476 г. Западная была уничтожена под ударами внешних и внутренних противоречий. Византия же просуществовала долго. Уровень познаний в области математики и механики в Византии был относительно высоким: сохранялось накопленное и достаточно комментировались сочинения эпохи эллинизма, а также был написан ряд интересных сочинений по фортификации и военной технике. Одним из авторов таких работ был Герон Младший (VII в.). Работал здесь выдающийся математик, оптик, механик Иоанн Филопон (ок. 660 г.). Именно он выступил против мнения Аристотеля, развитого его последователями – парипатетиками, что воздух воспринимает импульс, сообщенный брошенному телу, и играет по отношению к нему роль двигателя. Филопон утверждал, что полет в безвоздушном пространстве осуществляется легче, чем в среде воздуха, и, следовательно, импульс сообщается от двигателя исключительно брошенному телу.

Византия богата интересными храмовыми и другими постройками. Так, в 532–537 гг. два византийских архитектора и механика Исидор Милетский и Анфимий Тралльский построили в Константинополе храм Святой Софии с куполом, диаметр которого в основании имел 31,4 м. При этом вес купола равномерно распределялся на поддерживающую его конструкцию.

Крупным ученым в области математики и механики был византийский ученый Лев Математик (ок. 815 – ок. 870), армянин по происхождению. Ему принадлежит автоматическая система механизмов для тронного зала византийского императора: около трона он поставил золотых львов и птиц, которые во время торжественных аудиенций приводились в движение; птицы, кроме того, пели. Как видим, Византия сохранила искусство построения автоматов, развитое александрийскими механиками.

Было бы ошибкой думать, что только непосредственно в Византии развивалась механика. В сфере влияния Византийской империи находились Абхазия, Грузия и Армения, которым часто приходилось вести с ней борьбу, но влияние греческой культуры здесь было достаточно сильным. Вместе с тем это влияние было и обрат-

ным. Среди деятелей науки и техники Византии встречаются армянские и грузинские имена.

Техника Закавказья эпохи I тыс. была весьма высокой. Здесь были развиты обработка металлов, керамическое и ткацкое производства, обработка кож. По-видимому, первое железо было добыто в армянских горах, на горных речках Закавказья были построены водяные мельницы – первые машины в истории человечества. В Армении был разработан интересный вариант соединения купольных устоев со стенами, учитывавший сейсмические условия страны.

В Грузии особое развитие получило строительство крепостей и оборонных сооружений. Крепости строили с учетом рельефа местности. Сохранившиеся от V–VI вв. грузинские храмы и иные сооружения доказывают не только полную самостоятельность строителей и присущее им чувство красоты, но и большие познания в механике. Ими были созданы интересные строительные конструкции, учитывающие распределение сил, ряд решений соединений купола с поддерживающими его стенами.

В начале VII в. начались завоевательные войны арабов. Менее чем за 100 лет, к концу 30-х гг. VIII в., в состав Арабского халифата вошли огромные страны и территории, ранее принадлежавшие Римской империи и Персидскому государству, – образовалась колоссальная империя, которую населяло множество племен и народов, связанных общей религией и языками. Ислам и арабский язык стали религией и языком государства, науки и культуры. В халифате появились огромные библиотеки, в которых находилось до 150–200 тыс. томов, в том числе частные, а также и публичные: ученый и поэт Ибн Хамдан учредил в Мосуле Дом мудрости с библиотекой, которой мог пользоваться всякий стремившийся к знаниям. В 994 г. визир Ардашир ибн Сабур основал в Багдаде Дом мудрости с библиотекой в 10 400 томов. В Египте в 983 г. при мечети Ал-Азхар был основан университет, существующий и поныне. В X в. в Нишапуре было открыто медресе – училище нового типа.

Источниками развития культуры и науки народов стран ислама послужили как труды античных и византийских ученых, так и опыт, накопленный народами, входившими в халифат. Обычно

считается, что первым этапом развития арабоязычной науки явилась серия переводов научных сочинений с греческих оригиналов. Хотя с этим согласиться трудно. Не наличие переводов играло здесь роль, а потребности развивавшейся науки стимулировали появление переводов нужных сочинений. В частности, потребности практической механики заставили обратиться к сочинениям древних: Аристотеля, Герона Александрийского, Филона Византийского. Серьезное влияние на механиков оказали труды Иоанна Филопона, его учение развил, в частности, знаменитый Авиценна Ибн Сина (980–1037). Ибн Сина считал, что сила, приданная движущемуся телу, не уничтожается и что если не было помех движению, то оно продолжалось бы бесконечно долго. Неоднократно комментировались учеными стран ислама труды Аристотеля. Известны комментарии Ибн Сины и Мухаммеда аль-Бируни (973–1048), великого хорезмийского ученого-энциклопедиста. Следует особо отметить вклад хорезмийцев в точное естествознание; даже слово «алгоритм» является лишь латинизированным вариантом имени математика, труды которого лежат в основе арифметики и алгебры, – Мухаммеда Ибн Мусы ал-Хорезми (780–847).

Несмотря на то, что практическая механика этого периода представлена главным образом переводами трудов Герона, Филона и других эллинистических ученых и их комментированием, но комментарии зачастую выливались в самостоятельные сочинения. Так, в «Книге знаний» Ибн Сина рассматривает пять простых машин, их комбинации и применение для подъема и передвижения грузов. Абу Абдаллах ал-Хорезми (IX в.) во второй книге сочинений «Ключи наук» одну из глав посвятил механике. Работа является изложением «Механики» и «Пневматики» Герона.

Более самостоятельными трактатами являются «Книга о познании практической механики» Исмоила ал-Джазари (XII–XIII вв.) и «О водяных колесах и подъеме воды и о служащих для этого механических устройствах» Мухаммеда ал-Хорасани.

Переводились также и труды Архимеда. Известен перевод, выполненный Сабитом Ибн Коррой (836–901). Он также написал «Книгу о корастуне», в которой излагалась теория римских весов.

Большинство стран, входящих в состав халифата, таких как Южная Аравия, Египет, Месопотамия, Персия, Мавераннахр, Афганистан, Хорезм – существовали в условиях поливного земледелия. Ирригация была для них важнейшим делом; поэтому ученые арабоязычных стран проявляли к ее проблемам большой интерес. Водопользование было делом государственной важности, и государство содержало многочисленных чиновников – инженеров, которые должны были наблюдать за водой и за исправностью плотин, дамб, шлюзов. Было придумано много машин для ирригации: черпальные – зурнук и далийя, приводимое в движение водой черпальное колесо – наура, а также более сложные машины. Некоторые плотины достигали больших размеров. Так, на реке Кур в Персии в X в. была построена мощная плотина, основание которой залито свинцом. По обеим берегам были установлены десять водяных мельниц и десять черпальных колес; при помощи трубопроводов эта установка давала воду для орошения полей 300 деревень. Особое распространение получают в странах халифата водяные мельницы. На многих реках строились плавучие мельницы, чтобы наиболее полно использовать энергию воды.

В VIII в. в Персии и Ираке появляются ветряные мельницы различной конструкции. Имеются сведения о мельницах с ветряным колесом, лежавшим в горизонтальной плоскости; вертикальный вал вращал подвижной жернов.

В IX в. в Самарканде было изобретено производство бумаги из тряпья, и на длительное время этот город стал центром бумажных фабрик.

Прикладная механика в арабоязычных странах пополнилась новыми знаниями, так сказать, получила значительное приращение. Особенно увеличились познания в строительной механике и гидравлике; значительного развития достигла техника построения мельниц и военных машин.

Мировое значение науки арабоязычных стран состояло в том, что она сохранила и творчески развила науку, унаследованную от Греции и эллинистических стран, а также ввела в научный оборот результаты творчества индийских ученых. Это наследие

в области математики и механики различными путями было передано в Западную Европу. Одним из первых познакомил Западную Европу с арабской математикой бенедиктинский монах Герберт Ориллакский (ок. 938–1003), впоследствии папа Сильвестр II. Кстати, ему приписывают также изобретение механических часов. Но, возможно, это изобретение было сделано раньше, в халифате, поскольку арабоязычные ученые серьезно занимались изучением эллинистических и византийских трудов по автоматам. Есть сведения, что Карл Великий (786–814) в свое время получил часы в подарок от халифа Гаруна ар-Рашида.

Развитие механики в Западной Европе в течение 1 000 лет происходит двумя различными путями. Знания механически развивают практики, которым приходится сооружать здания и мосты, создавать военные орудия. Так, развивается практическая механика, которая только в конце рассматриваемого периода получает литературное оформление. Механикой как наукой занимаются ученые, которые преподают в школах: этот путь теоретической механики подобен тому, как в Греции между философами-теоретиками и механиками-практиками не существовало взаимного доверия, так и здесь между учеными-схоластами, практиками-инженерами и архитекторами незаметно согласия. Каждый работает для себя и редко одни считаются с опытом или знаниями других.

Средневековая школа пришла на смену римской с кругом знаний, заимствованных от этой последней. Делаются попытки как-то систематизировать их. Первой попыткой внести некоторый порядок в круг знаний, связанный с потребностями школы, была систематика позднеримского философа и математика Аниция Северина Боеция (ок. 470–525), который разделил науки на гуманитарные и математические, так называемые тривиум и квадривиум. В тривиум входили грамматика, риторика и диалектика, в квадривиум – арифметика, музыка, геометрия и астрономия (Грамматика – говорит, Диалектика – учит словом, Риторика – упрощает речь, Музыка – поет, Арифметика – считает, Геометрия – взвешивает и измеряет, Астрономия – считает звезды). Несмотря на то, что механикой иногда занимались в школах, в список наук она не попала, так

как до XVIII в. в системе школьных знаний механика относилась к математике.

Таким образом, еще в эпоху в эллинизма ученые начинают заниматься многими сторонами механики, в частности, статикой. Ученые же раннего Средневековья уже не удовлетворяются изучением равновесия тел: их интересует также, а может быть, еще в большей степени – движение тел. При этом они различают геометрию движения, кинематику и движение под действием сил – динамику.

2.3. Развитие механики как науки

Быстрое развитие феодальных отношений в эпоху Средневековья, особенно начиная с XII–XIII вв. и позднее, вызвало интерес к науке, технике, особенно к военной. Это объясняется ростом городов, замков, требующих мощной защиты, создания метательных машин (бриколь – для метания стрел; франдибола – для метания камней), подвижных устройств (аркобаллисты, смонтированные на колесной раме). Подобные изобретения в определенной степени стали возможными благодаря активизации инженерной деятельности, увеличению количества людей, занимающихся этой деятельностью.

Огромное значение в XIV в. имело использование пороха в Европе. С этого времени начинается эра огнестрельной артиллерии, развития металлургической промышленности и расширения знаний в области таких наук, как баллистика, динамика и др.

Уже в XIII в. ученые начинают активно интересоваться вопросами динамики. Развивается идея Иоанна Филопона о том, что сила, бросившая тело, передается этому телу. Ученые-схоласты путем рассуждения, а иногда и наблюдения приблизились к пониманию множества механических явлений. Учение об импетусе предложил французский ученый Жан Буридан, бывший одно время ректором Парижского университета. Оно заключалось в следующем: движущее тело получает от движителя импетус – определенную силу, которая может двигать его в том направлении, в каком его движет

движитель. Чем большей будет скорость, с которой брошено тело, тем сильнее будет приданный ему импульс. Именно импульс движет камень после того, как движение толчка прекратилось, но вследствие сопротивления воздуха и из-за тяжести, которая побуждает камень двигаться в сторону, противоположную импульсу, последний непрерывно ослабляется, иначе движение не прекратилось бы никогда. В конце концов импульс преодолевается, и тяжесть, воздействуя на камень, приводит его к «естественному местоположению». По Буридану, импульс пропорционален плотности и объему тела, к которому он приложен.

Важный след в истории механики оставили ученые Альберт Саксонский и Николай Орем (серед. XIV в.). Так, Альберт Саксонский много и умно рассуждает о центре тяжести, критикует в этом отношении Аристотеля, доказывает, что каждое тело имеет точку, в которой как бы сосредоточен весь его вес, и одновременно отстаивает то, что Земля находится в центре Вселенной. Он также являлся сторонником теории импульса. Существует точка зрения, что в определенном плане взгляды Альберта Саксонского повлияли на становление теории Галилея.

Ученик Буридана Николай Орем (1323–1382), разрабатывая идею ортогональных координат, утверждал, что графически можно изображать любые измеримые количества. В динамике он придерживался теории импульса, а в кинематике пользовался графическим изображением. Орем исследовал равномерное и неравномерное движение и был близок к правильной формулировке равномерно ускоренного движения. В своем трактате о небе и мире он придерживался мысли, что Земля движется относительно неба, и таким образом предвосхитил идею Н. Коперника.

Интересны поиски философа Фомы Аквинского (1225–1274). Являясь идеологом католической церкви, Аквинский основывал свое учение на творчестве Аристотеля, но указывал при этом, что область веры не следует смешивать с областью знания; ссылки на бога в вопросах физики считал невежеством. Он делал различие между математическими и физическими телами: первые делимы бесконечно, тогда как вторые имеют предел делимости, перейдя

который, перестают быть самими собою, разлагаясь на простейшие элементы. Аквинский утверждал также, что время непрерывно и связано с движением; рассуждал он и о бесконечности.

Развитие производительных сил, рост городов, укрепление церкви приводит к строительству храмов, монастырей, которые становятся сосредоточием не только веры, но и образования. Они оснащаются мощными оборонительными сооружениями. Бурно развивается цеховое производство. В частности, строительные цехи (каменщиков, отделочников) растут количественно и качественно, в них накапливаются практические познания из области строительной механики. Но многое делалось на ощупь и длительное время было результатом коллективных усилий.

Следует заметить, что уже в период раннего Средневековья началось становление, хотя и в достаточно широком понимании, и профессии инженера. Сначала эта профессия не была цеховой и означала лишь совокупность знаний, которые мог иметь зодчий, скульптор или художник помимо своих основных профессиональных умений. Сплошь и рядом один и тот же человек создавал машины, сооружал укрепления, строил водопроводы, ваял, писал картины и исполнял еще много мелких поручений феодального властителя либо бюргерской знати. Каждый такой инженер или архитектор обязательно должен был быть механиком, ибо без знания механики его машины могли отказать в действии, а выстроенные им крепости – не выдержать удара осадной мощи противника.

Сохранился любопытный документ начала 1481 г., в котором тридцатилетний Леонардо да Винчи (1452–1519) предлагает свои услуги правителю Милана Лодовико Сфорцг и где он характеризует разнообразие знаний инженера:

«Поскольку, сиятельныйнейший господин, я видал и продумал опыт всех тех, кто выдает себя за знатоков искусства изобретения военных машин, и нашел, что их инструменты не отличаются ни в чем существенном от тех, которые общеизвестны, я решаюсь... сообщить Вашей светлости о некоторых секретах, которыми обладаю я, в следующем кратком перечислении:

1. Я владею способом постройки очень легких мостов, которые можно легко переносить и с помощью которых можно привести врага в бегство и преследовать его. Знаю также и иные, более прочные, которые смогут противостоять огню и мечу и которые можно легко поднимать и опускать. Я знаю также способы сжигать и разрушать вражеские мосты.

2. В случае осады я знаю, как осушать рвы, строить складные лестницы и иные подобные машины.

3. Далее: в случае высокого местоположения или мощности враждебной позиции, когда невозможно ее обстрелять, я знаю способы уничтожить ее путем минирования, если только фундамент крепости не скалист.

4. Я умею также строить нетяжелые пушки, легкие в перевозке, которые могут бросать горючие материалы, дым коих вызовет ужас, разрушения и растерянность среди врага.

5. Далее: при помощи узких и извилистых подземных ходов, сооружаемых без всякого шума, я могу создать проход в самые недоступные места, причем даже под реками.

6. Далее: я умею строить безопасные крытые повозки для подвоза пушек к расположению врага, сопротивляться коим не смогут даже значительные силы и под защитой которых пехота сможет безопасно подойти к месту боя.

7. Я могу строить орудия, мортиры и огненные машины и иные, одновременно прекрасной и полезной формы, которые отличаются от всех, применяемых в настоящее время.

8. Или же, если применение пушек окажется невозможным, я смогу заменить их катапультами или иными прекрасными бросающими машинами, доселе неизвестными. Коротко говоря, я смогу создать бесконечное число орудий для нападения.

9. А если сражение должно разыграться на море, я знаю многие, чрезвычайно мощные машины как для нападения, так и для защиты и такие корабли, которые будут безопасны как от пушечной стрельбы, так и от огня. Знаю я также порохи и воспламеняющие вещества.

10. Полагаю, что в мирное время я смогу соревноваться с каждым по части архитектуры, а также по части сооружения общественных и частных монументов и в постройке каналов.

Я могу выполнять статуи из мрамора, бронзы и из глины; что касается живописи, то в ней я могу соперничать с любым. В частности, я смогу изваять из бронзы конную статую вашего вечной памяти отца... Если из вышеупомянутых вещей покажется что-либо вам невыполнимым, то я готов выполнить сие...» [11, с. 38].

Леонардо не преувеличивал. Он действительно и мог все, и занимался всем. В этом была сильная сторона его гения, но здесь же была и его слабость: он не мог сосредоточиться, многое начал, но немного закончил. После него осталось множество записок, схем и рисунков, которые он предполагал слить в трактаты. Этого он тоже не сделал. Многие из них относятся и к механике. Леонардо – практик, и его теоретические рассуждения играют лишь подсобную роль. В механике он занимался изучением движения тел по наклонной плоскости, законом рычага уяснил понятие момента, исследовал трение, падение тяжелых тел, законы гидростатики. В динамике он следовал учению Буридана. Он пробовал определить понятие силы, впрочем, без особого успеха, он пытался складывать и разлагать силы.

Леонардо первым исследовал полет птиц и приблизился к созданию летательного аппарата, тяжелее воздуха. Он создал много различных схем машин и предвосхитил идею о составе машины из механизмов (а не из «простых машин»). Он изучил трение и понял невозможность вечного двигателя лет за 300 до того, как это было доказано.

Начавшийся со второй половины XV в. Ренессанс явился величайшим переворотом в истории человечества, эпоха гигантов-ученых, величайших открытий, инженерных решений.

В годы деятельности Леонардо понятие «инженер» уже было в Западной Европе. Появилось оно около XII в. и обозначало строителя военных машин и фортификаций (т. е. специалиста, которого в эпоху эллинизма называли «механиком»), так как все технические средства по части ведения военных операций и обороны

назывались «*ihgenia*». С XV в. в Италии инженерами называли также строителей каналов, хотя еще в римское время уже есть такое упоминание.

Леонардо неоднократно указывал на значение математики для инженерного дела. В этом он следовал за знаменитым архитектором Филиппо Брунеллески (1377–1446).

Ф. Брунеллески сознательно пользовался расчетными методами и говорил о важности математики для всех искусств. Математические познания и изучение римских построек дали ему возможность установить пропорции здания, эстетические и одновременно оптимальные с точки зрения техники. Таким образом, в строительство вводятся методы расчета, что явилось одним из первых шагов перехода строительной механики от практической науки к прикладной. Шедевром Ф. Брунеллески стал купол флорентийского собора Санта-Мария-дель-Фьоре диаметром 42 м – на 10 м больше купола Софийского собора в Константинополе. Купол Брунеллески не имел правильной сферической формы, его внутренняя поверхность была описана радиусом, равным трем четвертям диаметра основания. Крепился он восемью ребрами, воспринимавшими вес фонаря и опиравшимися на углы барабана. Брунеллески возводил купол с 1419 по 1434 г. Для выполнения строительных работ он сконструировал и построил несколько кранов и иных подъемных машин.

Крупнейший художник немецкого Возрождения Альбрехт Дюрер (1471–1528) также широко пользовался математикой как прикладной наукой. В «Наставлении к укреплению городов» (1525) он разработал теорию фортификации. Дюрер применил геометрические методы и к изображению человеческого тела. В своих построениях пользовался циркулем, линейкой и опирался на основы проекционного черчения. Дюрер разрабатывал теорию пропорций, учение о перспективе и проекциях, которые использовал не только в живописи, но и в инженерных работах.

Тем временем в Польше, в старинном поморском городе Торунь, сын краковского купца каноник Николай Коперник (1473–1543), астроном и математик, работал над гелиоцентрической моделью

мира. Труд Коперника «Об обращениях небесных сфер» вышел из печати в год его смерти. Введя в теорию строения мира принцип относительности движения, Коперник не только значительно упростил очень сложную кинематику движения планет, разработанную в геоцентрической системе Птолемея, но и доказал, что Земля является одной из планет, вращающихся вокруг Солнца, и что, кроме того, она вращается и вокруг собственной оси. Революционное учение Коперника послужило основанием для развития науки о Вселенной. Впервые была поставлена задача о движении небесных тел не кажущемся, а естественном, чем подтверждена догадка древних астрономов и заложены основы новой науки – небесной механики.

В эпоху позднего Ренессанса (XVI в.) все больше работ посвящается проблемам прикладной механики. В 1537 и 1546 гг. вышло в свет два труда Никколо Тарталья (1499–1557), которыми были заложены основы теории полета снаряда, брошенного под углом к горизонту. Тарталья пользовался теорией импетуса, сопротивления воздуха он не учитывал. Его ученик Джованни Баттиста (1530–1590) развил учение о моменте силы относительно некоторой точки. В 1586 г. он высказал мнение, что тело, вращающееся вокруг точки, в случае нарушения связи с этой точкой полетит по касательной к окружности, а не по радиусу, как думали до того времени. Еще один ученый Бенедетти был последователем Коперника и в своих сочинениях приводил некоторые доказательства его гипотезы; он также развил теорию равновесия жидкости в сообщающихся сосудах.

Важных результатов в области прикладной механики удалось достичь выдающемуся итальянскому ученому-энциклопедисту Джироламо Кардано (1501–1576). В особенности он прославился как математик и медик, но с воодушевлением занимался и астрологией. В области механики он изучал сопротивление среды движению тел. Известно его доказательство невозможности вечного движения: подобно Леонардо, Джироламо учитывал вредные сопротивления. Кардано довольно основательно разработал теорию передач, к числу его достижений в этой области следует отнести идею

определения передаточных отношений путем подсчета чисел зубьев зубчатых колес. Ему также принадлежат некоторые изобретения в часовом искусстве и в практической гидравлике. Занимался Кардано и мельничным делом: в частности, опубликовал одно из первых описаний ветряной мельницы.

Как видим, в эпоху Ренессанса основная «работа» по созданию науки о движении выпала на долю инженеров и практиков, и занимались они главным образом прикладными вопросами. Это было совершенно естественно. Официальная наука, которую преподавали в университетах и которая в существеннейшей части основывалась на рассуждениях, себя исчерпала и начала тормозить развитие прогресса. Разделение науки на схоластическую – науку рассуждения и практическую – науку наблюдения и опыта постепенно принимает организационные формы. В первой половине XV в. возникают кружки ученых (пользующиеся иногда поддержкой князей и иных влиятельных лиц), которые получают название академий. Так, в 1438 г. Козимо Медичи основал во Флоренции Платоновскую академию, в 1478 г. в Риме возникает Академия Святого Луки, в 1542 г. – Витрувиевская академия, затем Академия дель Линчей (1603) и Академия дель Чименто (1607). Не все академии оказались жизнеспособными, но некоторые из них сумели сплотить постоянные коллективы участников, получить финансовую поддержку от власти имущих и стать официальными научными учреждениями. Некоторые академии приняли на себя образовательные функции. К примеру, в XVI в. Флорентийская академия искусств стала чем-то вроде политехнической школы: как и в университетах, здесь преподавалась математика, но уже не чистая (арифметика, алгебра, геометрия), а прикладная, которую можно было применять для решения задач техники и искусства.

Складывались условия для научной революции, формирования новой науки, основанной на эксперименте, опыте. Постепенно в недрах цехового производства развивается капиталистическая мануфактура, которая пока все еще основывается на ручном труде: машины продолжают заменять лишь физическую силу человека. Мануфактуры не могли обойтись без достаточно усовершенствованной

механической техники: подъемных приспособлений, печатных, масляных и монетных прессов, ткацких станков, бумажных и пороховых толчей, обычно с кулачковыми приводами, и т. п. В качестве энергетической системы применялись водяные колеса-приводы с использованием силы людей и животных, ветряные мельницы (при помоле муки). Такой была техника развивающихся мануфактур.

В период XVI–XVII вв. появляется целый ряд сочинений инженеров, в частности, Агостино Рамелли (1530–1590), Генриха Цейзинга (ок. 1560–1613), Соломона де Ко (1576–1630), Каспара Шотта (1591–1670) и др. Теоретическое сочинение по механике «Теория равновесия простых машин» написал около 1577 г. Гвидо Убальдо дель Монте (1545–1667), тосканский военный инженер. Через 20 лет, в 1597 г., Буонай Уто Лорини, военный инженер, служивший у Козимо Медичи, выпустил трактат «Об укреплениях», в котором свой практический опыт подтверждает теоретическими изысканиями. Он обращает внимание, в частности, на тот факт, что при расчете равновесия рычага нельзя исходить лишь из веса нагрузок и их расстояния от точки подвеса, но следует учитывать и собственный вес рычага.

Расширяются познания и в строительной механике. Итальянский математик Б. Бенедетти уже знает основы теории статических моментов; предполагает, что тела падают с одинаковой скоростью вне зависимости от их веса. Голландский инженер Симон Стевин (1568–1620) разработал теорию наклонной плоскости и установил, что если три силы находятся в равновесии, то их значения относятся как стороны треугольника, параллельные этим силам.

Появляется много машин, оснащенных новыми механизмами. А. Рамелли в сочинении «Разнообразные и искусные машины» (1588) привел изображения передаточных механизмов – зубчатых, винтовых, цепных – и дал описание различных, конструкций насосов. Профессор математики Вюрцбургского университета Шотт описал сложные установки, например, систему механизмов пивоваренного завода.

Развитие инженерной деятельности, вызванное усложнением машин, заставило обратиться к вопросам прав собственности

по отношению к профессиональным секретам. Отдельные патенты выдавались и в середине века. К концу XV в. Венеция имела уже достаточно развитую патентную систему. В XVI в. патенты и привилегии широко выдаются во Франции, Нидерландах, в империи Габсбургов.

В конце XVI и на протяжении XVII в. в теоретическом естествознании, математике и механике происходит длинная цепь открытий и разработка теорий. Результатом интенсивной деятельности ученых оказалась новая система миропознания. Этот период вошел в историю под названием научная революция: разрушались устоявшиеся представления о мире, природе, материи и движении, происходила крутая ломка уже сложившихся объяснений явлений природы, их использования, формировался новый метод мышления. Революция в науке началась с открытий Н. Коперника. Затем И. Кеплер (1571–1630) «упорядочил» Солнечную систему. Для механики наибольшее значение имели открытые И. Кеплером три закона движения планет вокруг Солнца, которые гласили:

I. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

II. Площади, описываемые радиусом-вектором планеты, в равные времена равны между собой.

III. Квадраты времен обращения планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Первые два закона Кеплер опубликовал в сочинении «Новая астрономия» в 1609 г., третий – в 1619 г. в трактате «Гармония мира». В динамике он высказал ряд мыслей об инерции и о притяжении тел как о всеобщем законе.

Зачинателем и теоретиком экспериментального метода в естественных науках считается английский философ и государственный деятель Френсис Бэкон (1561–1626). Нельзя сказать, что его личный вклад в естествознание был значительным. Вместе с тем Бэкон обосновал экспериментальный метод исследования, объявил физику «матерью всех наук» и отделил науку от теологии. Для этого надо было иметь немалое мужество и смелость. Начиная с XVII в. экспериментальный метод становится господствующим, а главные

интересы ученых сводятся к задачам механики. Даже революция в математике была обусловлена развитием науки о движении и о силах, его производящих.

Этот период характеризуется широкой постановкой и решением задач механики. Ученые систематизировали познания по статике, а полученные законы применяли для решения проблем прочности материалов и гидравлики. На основе динамических идей схоластов разрабатывается динамика, которая сразу же распространяется на баллистику, решаются задачи геометрии движений, и, пожалуй, лишь учение о машинах остается на уровне чистого описания, так как рабочие скорости были ничтожны и для расчета действия машин достаточно было элементарных законов статики.

В 1586 г. в Лейдене был опубликован на фламандском языке трактат о статике, который написал Симон Стевин. Автор стремится «очистить» статику от несвойственных ей учений, поэтому «отбрасывает» движение машин, сопротивления в машинах и те доказательства теорем статики, которые основаны на рассмотрении виртуальных скоростей. Интересно предложенное им решение задачи о равновесии тела на наклонной плоскости. Он исходит из положения о невозможности вечного движения и в этом отношении является преемником Леонардо да Винчи и Кардано.

Симон Стевин внес также важный вклад в развитие гидростатики, предложив принцип отвердения. В соответствии с этим принципом тело, обладающее плотностью, равной плотности воды, будет находиться в воде в состоянии равновесия.

Значительна роль в становлении механики как науки выдающегося ученого Галилео Галилея (1564–1642). Он изучал медицину, а затем математику, к которой тогда относились механика, оптика, гидравлика, астрономия и часть технических знаний. Физиком же тогда назывались и элементы знаний из биологии, физиологии, геологии и т. п., т. е. то, что можно было бы назвать естественной историей. Занимаясь традиционной механикой схоластов, он все же приоритет отдавал практической механике. В 1594 г. Галилей прочел в Падуанском университете курс лекций по механике, который был опубликован в Париже лишь в 1634 г. Содержание этих лекций

относится, собственно, к статике машин. Следуя учению Аристотеля, Галилей оценивает действие машины с помощью «момента» – произведения величины груза на скорость. Он указывает, что при рассмотрении машины нужно знать следующие составляющие: переносимый груз, перемещающую его силу, расстояние переноса и время, которое следует на это затратить. Большое внимание Галилей уделяет изучению движения тел по наклонной плоскости и приходит к формулировке закона падения тел, который стал основополагающим положением новой динамики. Ему принадлежат и другие важные положения, в частности, закон независимого действия сил и закон инерции, который Ньютон назвал «галилеевым законом инерции». Галилей активно поддерживал учение Коперника, невзирая на непринятие и осуждение последнего церковью. В 1632 г. он опубликовал «Диалог о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой». «Диалог...» был запрещен церковью, а сам автор привлечен к суду инквизиции и вынужден был отречься от отстаиваемой им теории.

В 1638 г. была издана еще одна книга Галилея – «Рассуждения и математические доказательства о двух Новых науках». С этой книги начинается история механики материалов и строительной механики. Здесь автор выясняет понятия растяжения и сжатия тел под действием нагрузки, исследует изгиб консольной балки и балки на двух опорах. Правда, не все его выводы оказались правильными. Например, он предположил, что напряжения распределяются равномерно по сечению и в случае растяжения, и в случае изгиба. Галилей выяснил также, что полые балки прочнее тех, которые имеют сплошные сечения. Именно такие балки находят разнообразное применение в технике, а еще чаще в природе (кости птиц, тростники и др.).

Продвижению механики вперед способствовали работы в области теории удара чешского ученого, профессора Карлова университета в Праге Иоганна Маркуса Марци (1595–1667). Он рассматривает соударение сферических твердых тел, движущихся по прямой друг против друга, и формулирует четыре закона, очень важных для дальнейшего развития механики.

Значительную работу в области механики проделал ученик Галилея Эванджелиста Торричелли (1608–1647). Продолжая исследования своего учителя, он обобщил знания о брошенном теле, рассмотрев случай, когда тело брошено под углом к горизонту. Успешно занимался он и механикой жидкости – изучал течения жидкостей через узкое отверстие, находящееся в нижней части сосуда.

Необходимо отметить, что при решении различных вопросов механики ученые свои рассуждения подкрепляли примерами из животного мира. Это относится и к Галилею, и к Леонардо да Винчи и др. С другой стороны, успехи механики побудили ученых-медиков искать применение ее законов к решению задач физиологии. Так, выдающийся физиолог и врач Уильям Гарвей (1578–1657), открывший кровообращение в теле, в 1628 г. пробовал количественно оценить объем крови в нем. Это учение, объясняющее физиологические процессы с точки зрения механики, получило название яtromеханики. Виднейшим представителем его был соученик Торричелли, медик и математик Джованни Альфонсо Борелли (1608–1679), профессор Мессинского университета, член Академии дель Чименто. Последователи яtromеханики, возникшей на стыке физиологии и механики и признающей возможность объяснения физиологических явлений с помощью механических аналогий, в дальнейшем смогли разработать и реализовать рабочие механизмы, которые заменили в производстве функции руки человека, а также создать роботы и манипуляторы.

В XVI–XVII вв., когда набирала силу научная революция, в некоторых странах делались попытки объединить усилия ученых, обменяться определенной информацией. Так, важнейшую роль в объединении ученых сыграл Марон Марсенн (1588–1648), школьный товарищ Декарта, крупный математик, естествоиспытатель и философ. Он был знаком едва ли не со всеми выдающимися учеными того времени – Декартом, Кавальери, Ферма, Паскалем, Робервалем, Торричелли. Именно благодаря Марсенну в 1634 г. на французском языке была издана «Механика» Галилея. Сам Марсенн много занимался этой наукой: исследовал колебания, ставил опыты по гидравлике и гидродинамике, писал о судах, плавающих

под водой и многое другое. Владея ценнейшей информацией того времени, Марсенн оказался в центре обмена научными новостями и создал кружок ученых, который уже после его смерти получил правительственный статут (1666) и был преобразован в Парижскую академию наук.

Почти одновременно с Марсенном в 1645 г. епископ Честерский Джон Уилкинс объединил вокруг себя группу ученых в Лондоне. В 1660 г. этот кружок получил наименование Лондонского королевского общества и таким образом фактически стал высшим научным учреждением Англии (Оксфорд), в Уставе которого подчеркивалось, что занятия богословием, метафизикой, этикой, политикой, грамматикой, риторикой и логикой для общества нежелательны. Насколько серьезны были задачи этого общества в области естественных наук, создания машин, развития мануфактур!

Эпоха научной революции богата на имена мыслителей, философов, ученых, чей вклад в механику не только значителен, но и поучителен. Одним из самых крупных в этой плеяде был Рене Декарт (1596–1650) – философ, физик, математик, физиолог, создатель учения «О картезианстве», которое в значительной степени определило дальнейшее развитие естественных наук. Декарт сделал вклад в рассмотрение понятия силы, дал оценку движения, изучил качание маятника и теорию удара.

Нельзя не назвать и великого ученого из Голландии Христиана Гюйгенса (1629–1695), прозванного «гениальным часовщиком всех времен». Особое значение для развития механики имел его трактат «Колебания в часах, или Геометрическое доказательство движения маятников в их применении к часам», опубликованный в Париже в 1673 г. Трактат имел пять частей. В первой части приведено описание новой конструкции маятниковых часов, в которой центр тяжести маятника движется по циклоиде. Вторая посвящена падению тяжелых тел и их движению по циклоиде. В третьей изложена математическая теория эволют и эвольвент, которая имела не только практическое значение для часового дела, но и фундаментальное для математики и механики: вместе с работами Марсенна и Паскаля по теории рулетты теория Гюйгенса была положена

в основу кинематической и дифференциальной геометрии. Четвертая содержит учение о центре качания. Пятая посвящена теории центробежной силы. Гюйгенсу принадлежат многие практические изобретения и глубокие теоретические исследования. Много внимания он уделял проблеме создания универсального двигателя, вместе с Дени Папеном (1647–1712) работал над сооружением пневматических и гидравлических машин, устройством фонтанов, насосов и многого другого.

К кружку Марсенна принадлежали два французских ученых, очень различных по характеру и складу ума, способствовавших развитию механики. Это были Паскаль и Роберваль. Блез Паскаль (1623–1662) создал счетную машину. Считается, что это была вторая попытка в истории мировой науки. Проект первой счетной машины был разработан в 1624 г. профессором Тюбингенского университета Вильгельмом Шиккардом (1592–1635), но он не был реализован. Паскаль сконструировал и построил свыше 50 моделей, пока не добился положительного результата. Машина была суммирующей и состояла из системы зубчатых колес. Существенным вкладом Паскаля в развитие механики стали его работы в области гидростатики. Он также проводил экспериментальные исследования веса и давления воздуха, разработал теорию кривых.

Изучением кривых, в частности, циклоиды, занимался и профессор математики Роберваль (1602–1675). Одновременно с Торричелли ему удалось сформулировать кинематический метод проведения касательной к кривой. С помощью этого метода он построил касательные к большому числу кривых. Одновременно с итальянским математиком Бонавентурой Кавальери (1598–1647) Роберваль разработал так называемый метод неделимых, развитие которого привело к созданию анализа бесконечно малых. Следует сказать, что именно ему принадлежит едва ли не первое в истории механики определение силы. По его словам, сила «есть качество, посредством которого тело стремится перемещаться в другое место, будет ли это место внизу, сбоку или сверху и независимо от того, присуще ли это качество самому телу или сообщено ему извне». Роберваль изобрел несколько приборов, в частности, ареометр и «весы Роберваля», проводил он и исследования маятниковых часов.

В кружке Марсенна принимал участие физик Эдм Мариотт (1620–1684), который стал затем одним из первых членов Парижской академии. Это был механик очень широкого диапазона: изучал механику твердого тела, механику жидкостей и газов, построил теорию удара, много экспериментировал. Результатом его опытов с газом (воздухом) стал известный закон Бойля – Мариотта. Изобрел Мариотт и баллистический маятник. В ходе проектирования водопровода для дворца в Версале Мариотту пришлось заняться теорией изгиба балок. Он убедился при этом, что теория Галилея неверна, поскольку напряжения при изгибе распределяются по сечению неравномерно: верхние волокна балок растягиваются, а нижние – сжимаются. Он установил также, что балка с заделанными концами выдерживает вдвое большую нагрузку, чем свободно лежащая на опорах. Исследовал он и прочность труб на разрыв под действием внутреннего давления.

Значительный вклад в становление механики как науки – основы инженерной деятельности – внес один из основателей Королевского общества Роберт Бойль (1627–1691), который был физиком, механиком и химиком. Независимо от Мариотта он открыл закон изменения объема газа в зависимости от изменения давления. Все явления, включая и химические, Бойль объяснял с точки зрения механики.

Нельзя не упомянуть и о Роберте Гуке (1635–1703) – крупнейшем английском ученом конца XVII в. С ним тесно сотрудничал Р. Бойль (усовершенствование воздушного насоса). Гук занимался физикой, механикой, биологией, геологией, физиологией, астрономией, был практикующим врачом и профессором геометрии. Среди его многочисленных изобретений немало относится к механике: анкерный ход часов, пружина баланса, насосы, приборы для испытания материалов, часовой привод телескопа, «шарнир Гука». Важнейшим его теоретическим достижением считается разработка доктрины всемирного тяготения. Впервые он высказал соображения относительно гравитации в очень коротком сообщении, прочитанном в Королевском обществе весной 1666 г. Гук объяснил движение планет совместным действием гравитации и силы инерции, поставил проблему происхождения гравитации и предположил ее

колебательный характер. К 1670 г. Гук установил универсальный характер тяготения. За исключением, быть может, Ньютона, он был единственным мыслителем, который ясно и отчетливо сформулировал эту доктрину. Очевидно, между 1675 и 1679 гг. Гук разрабатывал и ее математическую часть. Другим его открытием, также своевременно не оцененным, было объяснение света как «весьма коротких колебательных движений, совершающихся в поперечных направлениях к линии распространения света». Гук установил и закон пропорциональности между значением сил и размером производимых ими деформаций, носящий его имя.

Несомненно, велик и неизмерим вклад в развитие механики английского ученого Исаака Ньютона (1642–1727), члена Королевского общества (с 1672 г.), долголетнего президента этого общества (с 1703 г.). Его труд «Математические основания натуральной философии» (1687) стал основой для создания не только ньютоновской механики, но и нового миропонимания. Его работа как бы завершила научную революцию. Вплоть до разработки теории относительности А. Эйнштейном ньютоновская механика была единственной теорией всех земных и небесных движений; ее значение для техники остается непоколебимым. Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, по-видимому, независимо от Гука и в значительно более общей форме. Им были установлены три знаменитых «аксиомы, или законы движения».

Знаменитый труд Ньютона «Математические основания...» состоит из трех книг. Первая книга посвящена теории всемирного тяготения, вторая – учению о сопротивлении среды, третья – небесной механике. Работы Ньютона касались многих вопросов физики и механики. Он занимался теорией кривых, теорией перспективы. Ему принадлежит заслуга в изложении принципов метода флюксий, а также теоремы этого метода. Правда, следует заметить, что метод флюксий – ньютоновский вариант анализа бесконечно малых – стал объектом спора о приоритете, возникшего между Ньютоном и Лейбницем в 1699 г.

Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646–1716) был ученым-универсалом – математик, механик, физик, философ, занимался логикой, юриспруденцией, историей и богословием, а также психологией,

геологией и языкознанием. Он изобрел счетную машину, причем такую, от которой ведут свой род прочие аналогичные изобретения XVIII–XIX вв. Лейбниц изучал химию, медицину и горное дело, был дипломатом и принимал активное участие в организации Берлинской академии наук. В 1700 г. академия была открыта, и Лейбниц стал ее первым президентом. В 1673 г. он был избран членом Лондонского королевского общества, в 1700 г. – иностранным членом Парижской академии наук. В 1711, 1712 и 1716 гг. Лейбниц встречался с российским царем Петром I и давал ему советы относительно организации Академии наук в России. Широко занимался методом дифференциального исчисления, создал теорию цепной линии. Разработал основы символического исчисления по геометрии, ему принадлежит первый опыт алгебраизации анализа.

Человек с таким кругозором, как Лейбниц не мог не оставить глубокого следа в науке, в том числе и механике. Он вводит в механику понятие живой силы, кинематической энергии как меры движения, подходит к формулировке закона сохранения энергии при взаимодействии тел. Картезианцы же применяли в качестве движения произведение массы на скорость, т. е. количество движения. Хотя решения задач, выполняемых тем и другим методом, были совершенно одинаковы.

Несмотря на революционные преобразования науки XVII в., в технике не происходило коренных изменений, и она продолжает развиваться очень медленно. Впрочем, каких-то радикальных изменений (особенно в области энергетики) и не требовалось, поскольку машины оставались такими же, как и в прошлом веке. Практическая же механика не стояла на месте. Большие изменения наблюдались в строительстве, возник архитектурный стиль барокко, который получил широкое распространение в Европе и который требовал новых инженерных решений, создания механики материалов. Практика и ее запросы явились, несомненно, одной из побудительных причин для теоретических и экспериментальных выводов. Факты свидетельствуют, что в эпоху научной революции были заложены основы различных направлений прикладной механики, но уровня науки она достигла лишь более чем через столетие.

Важным в формировании механики как науки оказался XVIII в., когда происходили значительные перемены в производительных силах – техническая революция, а вслед за ней и промышленный переворот. Сущностью этих революционных перемен стало изобретение машин, позволивших заменить человека в прядении и ткачестве, появление силового универсального парового двигателя, создание суппорта токарного станка (т. е. машины, заменившей руку человека).

Техническая революция дала толчок развитию различных отраслей техники, а следовательно, и отраслей промышленности. В связи с этим возникла потребность в инженерах, которых ранее готовили путем индивидуального ученичества. Поэтому в XVIII в. повсеместно организуются технические школы. Однако механиков и технологов на протяжении всего XVIII в. никто не готовил. Мельницы, машины и различные технологические установки строили механики-практики, профессия которых зачастую была наследственной. Такой механик, отмечают историки техники, был иногда единственным представителем механических искусств и наивысшим авторитетом во всем, что касалось применения воды и ветра в качестве источников энергии для мануфактур. В своей округе он был механиком-универсалом и к тому же умел работать на токарном станке, знал слесарное, кузнечное и столярное дело. Он ремонтировал и исправлял установки, сооружал новые и запускал их, обслуживал все близлежащие населенные пункты и производственные предприятия, ибо, как уже говорилось, нередко был единственным механиком в округе.

Таким образом, механик XVIII в. был чем-то вроде бродячего инженера и ремонтера в одном лице. Он хорошо знал арифметику, кое-что из геометрии, иногда имел достаточно глубокие познания в практической математике, умел измерять, работал с уровнем, мог рассчитать скорость, определить мощность и нагрузку машины, составить чертеж, построить здание, колесо и плотину, соорудить мост. Все это умел делать английский и западноевропейский практик-механик; на Руси такой мастер на все руки назывался розмыслом.

Небольшие познания в математике имели и архитектор-практик, и военный инженер, и горный мастер начала XVIII в. С развитием производительных сил инженеров требовалось все больше, и в разных странах Европы стали возникать технические школы. Сначала военно-инженерные, артиллерийские, морские и горные, затем – путевые. Кстати, Россия одной из первых пришла к необходимости создания технических школ – Петр I заставлял изучать инженерное дело не только в Навигацкой и Инженерной школах и Морской академии, но и в духовных училищах.

Следует заметить, что преподавание механики в университетах и в технических школах было принципиально различным. Так, в университетах читался курс «прикладной», или «смешанной», математики, в программу которого, наряду с элементами статики, входили также некоторые сведения из оптики, гониометрии, космографии, фортификации, архитектуры, артиллерии и еще десятка наук. Для специальных школ это не годилось, поэтому начиная с 60-х гг. XVIII в. стали появляться учебники, в которых, помимо статики, в большем объеме излагались элементы динамики. Так, в 1764 г. в Петербурге вышел из печати учебник механики Л. П. Козельского. Подобные книги появлялись и в других странах. Во Франции учебник механики издал в 1764 г. известный астроном Н. Л. Лакайль, а 1774 г. вышел «Трактат по механике» Ж. Ф. Мари. Эти учебники содержали сведения не только по статике, но и по динамике.

Развитие механики в XVIII в. в значительной степени находилось под влиянием школы Бернулли. Братья Бернулли, Якоб (1654–1705) и Иоганн (1667–1748), стали родоначальниками целой династии математиков и механиков. В области точного естествознания в XVIII в. работали: племянник Якоба и Иоганна Бернулли – Николай I (1687–1759), сыновья Иоганна – Николай II (1695–1726), Даниил (1700–1782) и Иоганн II (1710–1790), сыновья Иоганна II – Иоганн III (1744–1807) и Якоб II (1759–1799). К школе Бернулли принадлежали также ученики Иоганна I – Г. Ф. Лопиталь (1661–1704) и Леонард Эйлер (1707–1783), слушавший его лекции в Базельском университете.

После Ньютона и Лейбница братья Бернулли и Лопиталь были первыми математиками, обладавшими техникой дифференциального и интегрального исчисления, с помощью которого они решили несколько важных задач механики (изохронной кривой и др.). Иоганн Бернулли в 1696 г. трудился над задачей о брахистроне – кривой, по которой тяжелое тело покрывает расстояние между двумя точками в кратчайшее время.

В 1688 г. математик Пьер Вариньон (1654–1722) представил Парижской академии наук доклад о проекте новой механики.

Первым трактатом, в котором была выстроена система механики, была «Механика, или Наука о движении» Леонарда Эйлера, где материал был изложен аналитически (1736). В своем трактате Эйлер развивает динамику как рациональную науку, в частности, исследует динамику точки, вводит понятие мощности, или силы.

Следующий шаг в этом направлении сделал Даламбер. Его научный труд по динамике был опубликован в 1743 г. Жан Лерон Даламбер (1717–1783) – один из самых блестящих ученых XVIII в. Он утверждал, что механика строится на основе трех принципов: инерции, сложного движения и равновесия. Считал, что необходимо учитывать лишь две причины изменения состояния тела: удар и силу притяжения. Первая часть работы Даламбера посвящена статике, вторая – динамике системы со связями. Трактат Даламбера отличается весьма сложными рассуждениями и не менее сложной терминологией. Практически он не повлиял на развитие методов механики. В качестве активного автора энциклопедии (начала выходить в 1751 г., к 1780 г. все издание составило 35 томов) Даламбер написал статьи, касающиеся математики, механики и других отделов точного естествознания, а также введение, в котором изложил свой проект систематизации наук.

Наряду со становлением механики, как основы инженерной деятельности, XVIII в. характеризуется интенсивной изобретательской деятельностью, которая дала практической механике развиваться в различных ее ответвлениях. Появляются новые станки и технологические машины в Англии, Франции и России. Ведется активная работа по созданию универсального парового силового

двигателя. В 1712 г. атмосферную машину для откачки воды из шахт сконструировал английский кузнец Томас Ньюкомен (1663–1729), решив таким образом задачу преобразования энергии пара в механическую. В 1722 г. машины Ньюкомена были установлены в Кеселе, Вене и Хемнитце. Первая машина Ньюкомена попала в Россию в конце века. Ее приобрели для Кронштадтского порта, хотя в самой России в то время пошла на слом значительно лучшая машина – машина Ползунова.

Продолжаются интенсивные поиски вечного двигателя. Появляется целый ряд заявок, хотя невозможность его построения доказал еще Леонардо да Винчи. Эти поиски стимулировали изобретательскую работу над автоматами. Сначала это были лишь механические игрушки, но идеи, заложенные в них, к концу XVIII в. приводили к важным результатам. Так, замечательный французский механик Ж. Вокансон (1709–1782) изобрел несколько остроумных автоматов, имитировавших движения человека и животных. Он же в 1745 г. создал механический ткацкий станок.

С развитием торговли и расширением городов непрерывно возросла роль дорог и водных путей сообщения. Их строительство ставило перед механикой много вопросов. В частности, в середине XVIII в. в Испании велись работы по сооружению Кастильского канала. Тогда же в Англии был прорыт первый судоходный канал. В России строительство каналов было начато при Петре I. Для снабжения Петербурга были прорыты два канала: Ладожский (длиной 104 версты), соединявший Волхов и Неву, и Вышневолоцкий, соединявший реки Тверцу и Мсту. Впоследствии было создано две системы: Тихвинская (связала реки Самину и Тихвинку) и Мариинская (соединила Ковжу и Вытегру). Так появилась возможность попасть водным путем из Каспийского в Балтийское море, а из столицы – непосредственно в центральные губернии России. Наиболее важная часть всей системы каналов – Вышневолоцкая – была существенно усовершенствована известным русским гидротехником М. И. Сердюковым (1677–1754). Он в течение 1720–1740 гг. построил целый комплекс гидротехнических сооружений и обеспечил бесперебойное движение судов.

Исследования в механике в рассматриваемый период захватывали все новые и новые области. Например, еще в 1662 г. П. Ферма (1601–1665) применил к решению одной из задач оптики принцип кратчайшего времени. В 1744 г. подобный принцип в механике был развит французским астрономом П. Мопертюи (1698–1759). В соответствии с этим принципом при всяком изменении в природе количество движения, которое потребно для такого изменения, является наименьшим возможным. В этом же году Эйлер нашел для данного закона математическую формулировку, исследуя форму кривых, которые принимает гибкий стержень при различных условиях нагрузки. Эту задачу он решил с помощью разработанного вариационного исчисления; рассматривал также задачи о поперечных колебаниях стержня. В 1757 г. Эйлер опубликовал работу «О силе колонн», в которой изучил проблему продольного изгиба колонн и вывел формулу для определения критической нагрузки. В других работах он возвращается к понятиям покоя и движения. Следует заметить, что Эйлер написал более 800 работ, многие из которых представляли научную ценность.

Значительное место в XVIII в. занимает изучение проблемы сопротивления среды движению. Одним из первых, кто обратил внимание на сопротивление воздуха, был Тарталья. Этой проблемой занимались и другие ученые. Так, Г. Амонтон (1663–1705) пришел к заключению, что трение между твердыми телами зависит лишь от относительного давления. В 1704 г. Паран (1666–1716) установил понятие угла трения, который он назвал углом равновесия, а тангенс этого угла – коэффициентом трения. Мусхенбрук (1692–1761) заметил, что на значения трения влияет и поверхность соприкосновения, а в 1722 г. М. Камю нашел, что трение движения меньше, чем трение покоя. Трение изучали Леопольд, Белидор, Эйлер. Например, Эйлер установил, что коэффициент трения является числом, близким к $1/3$. Поиски значения силы сопротивления среды начались позже – с середины XVIII в. Французский ученый Ж. Ш. Бордс (1733–1799) в 1762 и 1765 гг. вывел, что сопротивление жидкости движущемуся в ней телу пропорционально квадрату скорости.

В последней четверти XVIII в. изучением трения занялся Шарль Кулон (1736–1806). В 1781 г. он опубликовал «Теорию простых машин с точки зрения их частей...», в которой развил теорию трения и вывел законы, которые стали носить его имя. В это время делаются попытки создания теории машин.

Создание теории машин связано с именами Монжа и его ученика Карно. Гаспар Монж (1746–1818) учился на кондукторском отделении Мезерской военно-инженерной школы, позже серьезно изучал начертательную геометрию и создал техническое черчение, явился инициатором преподавания курса «Построение машин» и приблизился к формулировке основ классификации механизмов.

Большой вклад в механику внес Лазар Карно (1753–1823), который окончил ту же военно-инженерную школу, что и Монж. В 1783 г. Карно опубликовал «Опыт о машинах вообще», а в 1803 г. книга была переиздана под названием «Основные принципы равновесия и движения». Кстати, Карно считал, что механика по своей сущности является наукой экспериментальной, и этим подтверждал ее право на самостоятельное существование вне границ математики. Свою систему он строил на основании изучения движения, отрицая возможность построения ее из «метафизического и темного понятия силы». Фундаментальным законом механики Карно считал закон количества движения. Все законы и теоремы механики он рассматривал применительно к машинам. Книгу его уже можно отнести к прикладной механике.

Формирование механики как науки в XVIII в. завершил Лагранж. Его классическая работа «Аналитическая механика» вышла в Париже в 1788 г., в которой он отмечал, что, в общем-то, обобщил и окончил труды своих предшественников. Динамика Лагранжа основана на законе, который носит название уравнения Даламбера – Лагранжа. Из этого уравнения он выводит три закона: движения центра тяжести системы, моментов количества движения и живой силы. Лагранж также формирует принцип наименьшего действия и показывает, как из последнего можно было бы получить исходное уравнение. Далее он выводит уравнения, получившие название уравнений первого и второго рода. Однако следует признать,

что Лагранж не завершил механику и не сделал ее полного свода. Еще при его жизни начали формироваться новые направления: теория упругости, механика материалов, механика машин.

Большой вклад в развитие механики сделал П. С. Лаплас (1749–1827). Так, в 1799–1800 гг. он опубликовал два первых тома «Небесной механики». И, что самое существенное, в начале XIX в. начали весьма интенсивно развиваться именно те направления механики, которые основывались на экспериментальных законах и пользовались экспериментальными методами исследования.

Эксперимент еще в XVIII в. был характерен не только для науки, но и для техники, особенно для техники промышленного переворота. В принципе, все новые машины, заменившие руку человека, явились результатом глубокого и длительного экспериментирования. Так было и с паровой машиной Джеймса Уатта, который добился успеха в результате большой серии экспериментов. Следует сказать, что машина Уатта до конца XVIII в. была государственным секретом Англии, и вывоз таких машин из страны был запрещен.

Паровые машины собственными усилиями стали строить во Франции, в России, Германии, США и других странах. Так, в США Оливер Ивэнс (1756–1819) сконструировал паровую машину высокого давления (10АТ), построил первый в США локомобиль и изобрел прямолю («прямолю Ивэнса»). Это была первая попытка после Уатта найти механизм, преобразующий поступательное движение во вращательное. Можно сказать, что к началу XIX в. время практической механики проходит и наступает эра прикладной науки. Кстати, в Англии – стране самой передовой техники того времени – развитие механики отстает. Но промышленный переворот, поднявший Англию на более высокую ступень экономического развития, не мог не повлиять на английскую науку. Быстро развивающаяся машинная промышленность (производство машин) требовала ответа на возникающие вопросы, и она не могла долго ждать. Поэтому с начала XIX в. наука в Англии приобретает практический характер. Запросы промышленности стимулируют появление новых наук – «технических», основанных на наблюдении и опыте и уже во вторую очередь пользующихся расчетно-математическими

методами. Что касается «старых» наук, то здесь в основном развиваются их прикладные направления. Очевидно, именно в связи с этим в Англии до середины XIX в. не открываются технические школы. Англичане пользуются старыми, традиционными методами ученичества, но знания в области механики продолжают накапливать и совершенствовать.

Существенный вклад в механику упругого тела сделал Томас Юнг (1775–1829). Он в 1807 г. опубликовал в Лондоне «Курс лекций по натурфилософии и по механическим искусствам», в котором изложил сведения из самых различных областей знания. Во втором томе этого энциклопедического курса содержится определение модуля, позже названного модулем Юнга, который стал важнейшим понятием новой отрасли механики – теории упругости. Юнг показал также, что срез является одной из упругих деформаций, сформулировал понятие нейтральной линии при изгибе. Развитие теории упругости продолжили ученые, среди которых выдающуюся роль сыграли французы Навье, Коши и Сен-Венан.

Значительный вклад в развитие механики, особенно на рубеже XVIII–XIX вв., внесли ученые Парижской политехнической школы. Так, один из ее организаторов Пьер Симон Лаплас создал небесную механику как новое направление науки. Он завершил объяснение движения тел Солнечной системы на основе закона всемирного тяготения, в результате чего развил свою знаменитую космогоническую гипотезу. Лаплас сформулировал задачу о трех телах, изучил движения небесных тел, в частности Луны, и разработал теорию приливов и отливов, которая стала существенным вкладом в гидродинамику. В его «Небесной механике», состоящей из пяти томов, механика рассматривалась как физическая наука. Лаплас является одним из основоположников молекулярной механики – механики, основанной на молекулярной теории строения вещества (в первой половине XIX в. понятия молекулы и атома считались тождественными). Молекулярным притяжением тогда объясняли химическое сродство, явление упругости, капиллярность и иные физические явления, не поясняемые теорией всемирного тяготения.

Физическую сущность механики подчеркивали и другие французские ученые – Пуансо, Пуассон, Навье. Так, воспитанник Политехнической школы Луи Пуансо (1777–1859) ввел в механику понятие «пара сил» – двух равных сил противоположного направления, приложенных к разным точкам плоскости. Он показал, что значение пары сил равно произведению силы на кратчайшее расстояние между направлениями сил. Вообще, понятие «пары сил» было важнейшим в статике Пуансо, с его помощью он вывел теорему о том, что любое число сил, действующее на твердое тело, можно привести к силе и к паре сил. Пуансо разработал теорию вращения тел, установил один из случаев вращения гироскопа, сформулировал понятие эллипсоида инерции. Механика Пуансо была физической в еще большей степени, чем механика Лапласа, и в значительной мере стала основой для разработки прикладной механики.

Существенный вклад в развитие механики внес Симон Дени Пуассон (1781–1840). Будучи учеником Лапласа, он являлся одним из самых ярких теоретиков молекулярной механики, занимался небесной механикой. Успешно решал задачи полета снаряда и отдачи орудия, издал «Учебник механики» (1811), где изложил основы механики как физической науки и применил ее к различным задачам физики, астрономии и артиллерии.

Среди выпускников Политехнической школы выделяется также Луи Мари Анри Навье (1785–1836). Работая одно время инженером, он исследовал ряд вопросов практической механики, активно участвовал в создании теории упругости и сопротивления материалов. Навье развил теорию изгиба балки, предложил общий метод решения статически неопределимых задач, получил дифференциальные уравнения равновесия упругого изотропного тела. Используя метод Даламбера, он вывел общие уравнения движения упругого тела. Его работы легли в основу строительной механики.

Появление локомотива, изобретение американским инженером Робертом Фултоном (1765–1815) парохода способствовали развитию речного и морского механического транспорта, а это, в свою очередь, привлекло внимание ученых к вопросам динамики машин. Аварии локомотивов и паровых машин происходили по разным

причинам: не были известны их динамика, поведение материалов, из которых они сооружались; недостаточно была разработана и техническая термодинамика. Поэтому железные дороги стали своего рода лабораторией, на базе которой создавались прикладные и технические науки, в том числе строительная механика, теория сооружений и в значительной степени динамика машин.

В последнем направлении успешно работали почти одновременно Жан Виктор Понселе (1788–1867) и Гюстав Гаспар Кориолис (1792–1843). Так, в 1829 г. Кориолис опубликовал работу «Вычисление действия машин», в которой поставил вопросы динамики машин. Ему принадлежит известная теорема о трех слагающих полного ускорения: относительной, переносной и добавочной. Понселе создал стройную систему динамики машин, основанную на глубоком изучении паровой машины. Одновременно с Кориолисом он работал над уточнением понятия механической работы, применил это понятие к вычислению действия машин.

Следует заметить, что английское машиностроение в первой половине XIX в. стояло значительно выше машиностроения стран континентальной Европы.

В Англии зарождается и техническая пресса. В 1797 г. вышел первый номер «Журнала Николсона», посвященного практическим вопросам технических знаний; в 1798 г. – «Философский журнал», также посвященный техническим наукам. В 1841 г. в Англии были опубликованы две книги по вопросам прикладной механики: «Механика инженерного дела» Уэвелла (1794–1866) и «Принципы механизмов» Роберта Виллиса (1800–1875). Уэвелл систематизировал практические задачи механики; Виллис занимался проблемами практической кинематики, в частности, ввел понятие механизма как элементарной составляющей машины. Он внес также большой вклад в создание теории зубчатых зацеплений.

В те же годы профессор математики Кембриджского университета Ч. Беббидж (1792–1871) трудился над созданием вычислительной машины. Однако задача, которую он поставил, не могла быть решена в то время. Еще не было создано соответствующих технических условий. Машина Беббиджа предполагала программное

обеспечение. Кстати, первым программистом стала женщина-математик, дочь Байрона Ада Лавлейс (1815–1852).

В первой половине XIX в. работал замечательный английский механик Уильям Гамильтон (1805–1865). Он проводил исследования в области оптической механики, в частности, создал оптику по образцу механики Лагранжа, сформулировал закон наименьшего действия. Дальнейшая разработка этого закона привела к созданию метода интегрирования задач динамики Гамильтона – Якоби – Остроградского.

В 1851 г. в Лондоне открылась первая Всемирная выставка, на которой были показаны машины, построенные в различных странах мира. Выставка продемонстрировала значительный прогресс в области мирового машиностроения, который в том числе отражал и достижения теоретических наук, в частности механики. Поскольку теория не могла еще ответить на многие вопросы практики, вслед за прикладными возникают технические науки, основанием для которых служат наблюдения и опыт. Их научная база была неглубока: из разных соображений, иногда несовместимых между собой, строились формулы со многими эмпирическими коэффициентами. Следует заметить, что число этих наук непрерывно росло. В частности, появление железных дорог дало толчок для создания строительной механики и теории сооружений.

В строительной механике середины XIX в. возникает проблема расчета свода как упругого тела, которую вначале пытался решить ученик Клапейрона – Шарль Бресс (1822–1883). Затем его работу самостоятельно повторил немецкий ученый Отто Мор (1835–1918). Вскоре появилась новая задача – теория ферм. Быстрое развитие железных дорог выдвинуло на первый план необходимость расчета и строительства мостов. С середины XIX в. теория ферм становится одной из важнейших задач теории сооружений. Важные исследования в этом направлении выполнил русский инженер Д. И. Журавский (1821–1891). Он принимал участие в проектных и строительных работах при сооружении мостов Петербургско-Московской железной дороги, а затем руководил Департаментом железных дорог. При расчете многопролетной неразрезной фермы

Журавский впервые применил метод деформаций. Дальнейшие вычисления в области теории ферм проводили Шведлер (1823–1879), Ламе и Максвелл.

К середине XIX в. начались поиски графических методов решения задач механики. Векторное исчисление находилось в процессе становления, но уже давно умели воспроизводить параметры статики графическими методами. В 1687 г. Ньютон и Вариньон установили закон параллелограмма сил, ставший основанием для создания графических методов. Позже Вариньон разработал метод веревочного многоугольника. Ряд графических построений предложили Клапейрон и Ламе. Дальнейшее развитие графическая статика получила в трудах профессора Римского политехникума Луиджи Кремона (1830–1903). Метод графического расчета ферм, созданный им на основе идей Максвелла, носит название диаграммы Кремона – Максвелла. Так в механику проникли графические методы расчета. Начиная с 70-х гг. XIX в. эти методы применяются и в учении о машинах, где создаются важные разделы графической динамики и графической кинематики. Такой обмен методами и идеями, несомненно, был прогрессивным и способствовал развитию и возникновению новых направлений науки.

К концу XIX в. развитие механической техники еще более ускорилось. Были созданы новые машины – гидравлические и паровые турбины, электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания. С появлением последних облегчилась работа над созданием само движущихся экипажей – автомобилей – и аппаратов тяжелее воздуха для воздушного пространства – самолетов. Таким образом, парк энергетических машин расширился, хотя и не в такой степени, как парк машин технологических, который увеличивался чрезвычайно быстро. Сам этот факт весьма интересен. Совершенствование старых и создание новых рабочих машин отвечало потребностям капиталистического производства, поскольку машины для осуществления технологических процессов гарантировали увеличение прибылей. Разработке энергетических машин отводилась второстепенная роль, так как к паровым за 100 лет привыкли, а к новой энергетике относились без особого доверия. С этим обстоятель-

ством связан и другой факт из истории науки о машинах. Паровая машина в начале XIX в. была достаточно хорошо изучена, и ее теория составила основное содержание важнейшей отрасли механики – динамики машин; теорию же «новых» машин создать в XIX в. еще не удалось, да в этом и не было необходимости, поскольку разнообразные типы машин возникали как экспериментальные модели и их рабочие и технологические возможности оценивались практикой и временем.

Большое значение для изучения динамики кривошипно-ползунного механизма паровой машины имела монография австрийского инженера Иоганна Радингера (1842–1901) «О паровых машинах с высокой скоростью поршня», в которой был приведен графический расчет действия сил в этом механизме. Интересны и работы Эрнеста Отто Шлика (1840–1913) – немецкого корабельного инженера, опубликовавшего исследование об уравнивании поступательно движущихся масс.

Шестидесятые годы XIX в. характеризуются активизацией интереса к теоретической кинематике. Среди работ на эту тему необходимо отметить «Трактат чистой кинематики» (1862) профессора Политехнической школы Анри Резаля (1828–1896). Важнейший вклад в развитие данного направления внесли русский ученый П. Л. Чебышев, который ввел в теорию механизмов математические методы; англичанин Джеймс Джозеф Сильвестр и другие ученые, которые работали над воспроизведением математических зависимостей при помощи механических средств.

Значительных результатов в области прикладной кинематики удалось достичь выдающемуся немецкому машиностроителю Францу Рело (1829–1905). Он сформулировал задачи кинематики и указал на важнейшую структурную особенность механизмов – существование кинематических пар, т. е. сочетаний звеньев и кинематических цепей, соединений звеньев с помощью кинематических пар.

П. Л. Чебышев «разрабатывал» аналитическое направление в решении задач теории механизмов, Франц Рело рассмотрел эти задачи как машиновед, а затем геометры Амеде Мангейм (1831–1905), Зигфрид Аронгольд (1819–1884) и Людвиг Бурместер (1840–1927)

создали новое направление – кинематическую геометрию, на базе которой Бурмистер сформулировал геометрический метод синтеза механизмов. Почти одновременно тремя учеными: Отто Мором в 1879–1887 гг., Робертом Смитом в 1885 г. и Бурмистером – был создан учебник кинематики, опубликованный в 1888 г. Главным в этих работах было решение задач кинематики методом планов скоростей и ускорений.

Развитие машиностроения, строительство зданий и путей сообщения способствовали в конце XIX в. появлению интереса к задачам механики сложной среды: на основе применения математических методов были поставлены и решены новые задачи теории упругости, сопротивления материалов, гидродинамики; начиналась интенсивная исследовательская работа в области теории колебаний, теории устойчивости, аэродинамики.

Среди представителей научной мысли конца XIX в. следует назвать ученика Сен-Венана – Буссинеска, который изучал деформацию тел. Его работы охватывали большой диапазон проблем механики сплошной среды. Он занимался, в частности, теорией колебаний стержней, теорией удара, теорией пластинок. Буссинеск является одним из основоположников механики сыпучих тел. Ему также удалось решить ряд задач по расчету подпорных стенок.

Значителен вклад в механику Джона Уильяма Стретта, лорда Рэля (1842–1919), который еще в 1877 г. опубликовал монографию в двух томах «Теория звука». Первый том посвящен колебаниям струн, стержней, мембран, пластинок и оболочек. Рэлей в своем исследовании пользовался методом обобщенных сил и обобщенных координат, в частности, он показал, что экспериментальным путем можно получить решения для статических и статически неопределенных систем. Метод Рэля заключался в сведении задачи о колебании сложной системы к исследованию колебаний с одной степенью свободы. Естественно, что решение получилось приближенным. Немецкий физик Вальтер Ритц (1878–1909) усовершенствовал метод Рэля, предложив определять частоты колебаний непосредственно из энергетического условия, без решения дифференциальных уравнений. Метод Рэля – Ритца широко применяется

для решения задач теории колебаний, теории упругости, теории сооружений и в других областях механики.

Труд Рэлея вместе с монографией Томсона и Тейта «Курс натуральной философии» (1867) составили почти полную энциклопедию «прикладной механики» XIX в.

Дальнейшее развитие железнодорожного строительства стало одним из важнейших факторов повышения спроса на сталь, стальные конструкции (мосты и др.). К числу сооружений, в которых использовались металлические конструкции, относится башня в Париже (Эйфелева башня). Построил ее инженер и механик Александр Гюстав Эйфель (1832–1923). В итоге высота башни вместе с флагштоком достигала 312,275 м. Строительство продолжалось с января 1887 г. и до 30 марта 1889 г.

Возведение подобных сооружений поставило перед механикой целый ряд новых вопросов, в частности, касающихся устойчивости. Существенный вклад в решение проблем устойчивости сделал профессор Петербургского института путей сообщения Ф. С. Ясинский (1856–1899) и профессор Политехнического института в Карлсруэ Фридрих Энгессер (1848–1931). На основе их работ, а также трудов других ученых появилась теория сооружений. Позже, как самостоятельная ветвь механики, выделилась аэродинамика, создание которой в значительной степени связано с именем Н. Е. Жуковского.

Факты вполне достоверно свидетельствуют, что на протяжении XIX в. как в теоретической, так и прикладной механике были достигнуты большие успехи. Математизация механики, которая началась в XVIII в. и оказалась чрезвычайно плодотворной и для развития самой математики, продолжается и в XIX в. Кстати, математизируются и многие направления физики. В течение XIX в. были созданы или заново прочитаны такие главы физики, как оптика, учения о теплоте, электричестве и магнетизме. Подобно механике, физика содействует развитию новых математических теорий и разработке нового математического аппарата.

В конце XIX и начале XX в. в физике, механике, математике стали обнаруживаться факты, которые не укладывались в стройную систему классической науки. В первую очередь, это неевклидова

геометрия Н. И. Лобачевского, которая была изложена в его труде «О началах геометрии» (1829). Вначале она не была понята даже некоторыми учеными, в том числе и М. В. Остроградским. Общее признание геометрия Лобачевского получила лишь после его смерти, когда в 1868 г. итальянский геометр Эудженио Бельтрами (1835–1900) доказал ее непротиворечивость. Независимо от Лобачевского к его идеям пришел также венгерский геометр Янош Бойяи (1802–1860). На рубеже XIX–XX вв. появляется новый подход к решению задач механики – использующий аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Это все повлекло за собой и некоторые философские выводы: если законы Ньютона допускают широкое толкование и к ним можно применять коррективы, то не значит ли это, что описание явления не отражает его действительной сущности, а есть лишь некоторая условность, не имеющая отношения к реальности? Формализация вопроса об описании явления приводила в конце концов к отрицанию объективной реальности вообще: к такому выводу пришел, в частности, профессор Пражского университета Эрнст Мах (1838–1916) – физик-экспериментатор, философ-идеалист.

Как ни парадоксально, к концу XIX в. интенсивная работа над решением вопросов теоретического естествознания привела к тому, что количество накопленных фактов увеличилось; они появлялись и в физике, и в механике, и в математике. Кроме того, оказалось, что аппарат, который математики предоставляли в распоряжение физиков и механиков, не всегда удовлетворял последних, и им приходилось разрабатывать свой собственный. Так, во второй половине XIX в. совместными усилиями физиков, механиков, математиков было создано векторное исчисление, а физиком и инженером Хевисайдом – операционное исчисление. Нужно сказать, что операционное исчисление стало одним из первых направлений прикладной математики конца XIX в. Если в XVIII в. под прикладной математикой понималась чуть ли не вся физика и механика с добавлением целого ряда технических направлений, а в XIX в. прикладной математикой обычно называли аналитическую механику, то в самом конце XIX в. так называют уже различные теории,

не всегда строго обоснованные, но всегда имевшие практическое применение и позднее изменившие содержание прикладной математики.

Все эти поиски и открытия предопределили начало революции в естествознании, которая произошла на рубеже XIX–XX вв. В это время были обнаружены явления, объяснить которые тогдашняя наука не могла.

На 1895–1897 гг. пришлось крушение понятия об атоме как неизменной первичной и неделимой частице. Ряд открытий показал, что атом имеет сложное строение, а его структурным элементом является электрон, который был открыт в 1897 г. В 1895 г. Рентген выявил особого рода излучения, в 1896 г. Беккерель обнаружил явление радиоактивности урана. Попытки объяснить эти факты с помощью старых физических теорий не увенчались успехом. Вскоре ученые пришли к мысли: при объяснении новых явлений отказаться от общепринятых классических положений. Открытие радия, сделанное М. Склодовской и П. Кюри в 1898 г., не только констатировало научный факт, но и содержало в себе частичное объяснение. В 1899 г. П. Н. Лебедев измерил давление света. В 1900 г. М. Планк (1879–1955) предложил квантовую теорию излучения. В 1909 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди создали теорию радиоактивного распада – возникла новая идея о возможности превращения элементов. В 1905 г. А. Эйнштейн (1858–1947) выступил со специальной теорией относительности, а затем установил соотношение между массой и энергией, что было невозможно в системе «старой» классической механики Ньютона.

В результате открытий периода «новейшей революции» в физике проявляются определенные идеологические шатания, которые приводят к созданию новой картины мира в связи с появлением теории относительности.

Важную роль в становлении теории относительности сыграли работы профессора Лейденского университета Гендрика Антона Лоренца (1853–1928). Им было найдено преобразование (так называемое преобразование Лоренца), в котором время играет роль четвертой координаты. Это преобразование позволило объяснить

некоторые результаты, полученные при наблюдении оптических и электродинамических явлений. Наряду с теоретическими исследованиями Лоренца, для развития новой физики немаловажное значение имели опыты Альберта Майкельсона (1852–1931). Они показали, что скорость света в вакууме является универсальной постоянной. Приблизительно к этому же времени (80-е гг. XIX в.) относится критика Эрнестом Махом ньютоновых понятий абсолютного пространства и абсолютного времени. Все это в совокупности, как и работы французского математика и механика Анри Пуанкаре (1854–1912), объективно послужило основой для создания новой области физики – теории относительности.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн публикует свой знаменитый труд «К электродинамике движущихся тел». Он порывает с ньютоновской концепцией абсолютного пространства и времени. В его формулировке принципы относительности и постоянства скорости света гласили:

1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, относятся эти изменения состояния.

2. Каждый луч света движется в покоящейся системе координат с определенной скоростью, независимо от того, испускается ли луч света покоящимся или движущимся телом.

В 1906 г. Макс Планк (1858–1947) применил принцип относительности к уравнениям динамики. Тогда же Эйнштейн опубликовал статью «Принцип сохранения движения центра тяжести и инерция энергии», в которой описал мысленный эксперимент, устанавливающий связь между энергией светового импульса и силой света. В 1908 г. Герман Минковский (1864–1909) предложил геометрическую инженерную теорию относительности: мир есть многообразие всех мыслимых значений трех измерений пространства совместно с четвертым измерением – временем.

Следующим шагом в разработке теории относительности стала работа Эйнштейна «Основы общей теории относительности», в которой он сформулировал постулат относительности: законы

физики должны быть составлены так, чтобы они были справедливы для произвольно движущейся системы. Общая теория относительности Эйнштейна была опубликована в 1916 г. Ее основные понятия были тесно связаны с проблемой гравитации. В сущности, Эйнштейн пришел к своей общей теории от изучения гравитации. И вот здесь оказалось, что геометрией этой теории является неевклидова геометрия, которую, как известно, первым начал разрабатывать Н. И. Лобачевский. В ее создании принимали участие не только Лобачевский, Бойяи, Бельтрами, но и другие ученые, в том числе Бернгард Риман, Уильям Клиффорд.

Следует заметить, что теория относительности не сразу получила признание. Уж слишком необычным было новое миропонимание: теория относительности заставила по-новому взглянуть на движение электронов, планет и галактик в космическом пространстве.

Начало XX в. характеризуется тем, что земная механика продолжает оставаться в рамках, предписанных ей Ньютоном. На протяжении всего 25-летия (1890–1915) в технике решается ряд очень сложных задач эпохального значения. Был создан двигатель Дизеля, разработана удобная в эксплуатации форма паровых турбин, сконструирован автомобиль и найден способ использования электроэнергии для нужд транспорта. Было изобретено радио, человек поднялся в воздух на аппарате тяжелее воздуха, и началось быстрое развитие авиации. Машиностроение поставляло на рынок все новые и новые модели, совершенствовались и изобретались новые машины для обработки металлов. Все это определяло направления исследований в прикладной математике и прикладной механике.

Интересны работы в области аэромеханики Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, которые, в частности, развили теоретическую аэродинамику, в том числе теорию профиля крыла самолета. Эти ученые работали также в областях гидродинамики и газовой динамики, в которых им удалось создать основополагающие труды. В аэродинамике существенные результаты были получены Фредериком Ланчестером (1878–1946) и Вильгельмом Кутта (1867–1944), а также Людвигом Прандтлем (1875–1953). Именно последний развил учение о турбулентном течении и теорию пограничного слоя.

Одним из направлений научной деятельности Н. Е. Жуковского была механика машин, где его теорема о жестком рычаге является одним из самых элегантных методов кинестатики. Ученик Жуковского – Н. И. Мерцалов (1866–1948) написал курс прикладной механики, в котором впервые с исчерпывающей полнотой были освещены вопросы динамики машин. Курс этот был издан в 1904 г. и переиздан в 1914–1916 гг.

Основы динамики тела переменной массы заложил чешский ученый Георг фон Бюкуа еще в 1812–1814 гг. Однако в то время исследования его не получили дальнейшего развития. Позже некоторые задачи в этом направлении были решены английскими учеными Кэйли, Раусом и др.

Существенный вклад в развитие теории механики тела с переменной массой сделали русские ученые К. Э. Циолковский и И. В. Мещерский. Мещерским и коллективом преподавателей механики Петербургского политехнического института был написан «Задачник по курсу теоретической механики», который был переведен на несколько языков и который использовался вплоть до настоящего времени. Этот задачник считается лучшим пособием в мировой учебной литературе и по механике.

Период, охватывающий начало XX в., оказался чрезвычайно плодотворным в истории теоретической и прикладной механики. Именно в эти годы были высказаны многие идеи, развитые впоследствии в целые научные направления. Некоторые из этих идей и открытий не укладывались в рамки классической науки и стали теми «катализаторами», с которых началась коренная перестройка в естествознании.

Для механики первых двух десятилетий XX в. характерен повышенный интерес к сравнительно небольшому числу проблем: аэродинамике, гидродинамике, теории рабочих машин, неголономной механике. Объясняется это, особенно для России, тем, что было необходимо быстрое решение технических проблем, прикладная же наука требовала капиталовложений, которые были весьма ограничены, а вот теоретическая наука могла развиваться и при минимальных затратах. Между тем большинство направлений механики

в первой половине XX в. уже достигло в своем развитии такого состояния, когда нужны были не только идеи, но и материальная база для их претворения. В частности, так обстояло дело с авиацией, на которую не жалели средств, ибо польза от такого капиталовложения была очевидной.

Исследованиями в области аэродинамики занимались многие ученые. Во Франции был организован институт механики, директор которого Анри Вилла поставил и решил ряд задач современной аэродинамики. Работы французских ученых в этом направлении были подготовлены трудами Буссинеска, Пуанкаре, Адамара. Буссинеск изучал вопросы гидродинамики в самом широком диапазоне: течение жидкости в открытых и закрытых каналах, движение подземных вод, давление в жидкости и др. Жак Адамар (1865–1963) занимался проблемой распространения волн и развил ее математический аппарат – теорию уравнений в частных производных.

Возрождение интереса к механике машин приблизительно в эти же годы происходит в Германии. После выхода в свет монографии Виттенбауэра «Графическая динамика» (1923) основным исследовательским направлением становится синтез механизмов по Бурместеру. На основе работ Бурместера, Грюбрела и Миллера профессор Дрезденской высшей технической школы Г. Альт развивает геометрический метод синтеза плоских механизмов. Синтез механизмов – способы создания новых механизмов для воспроизведения требуемых законов движения – становится одной из важнейших задач механики машин. Делается попытка разработать такой метод синтеза, который можно было бы выполнить путем ряда проб (эмпирический метод Рау, развитый немецкими учеными). Сочетая методы Ассура и Бурместера, в СССР машиноведы начинают вести поиски новых способов анализа и синтеза механизмов. В середине 1930-х гг. Н. Н. Артоболевский (1905–1977) создает научную школу в области теории механизмов и машин. Впервые на рубеже механики и теоретических основ машиностроения возникло новое научное направление, использующее в равной степени теорию и эксперимент, а также классическое наследие Эйлера, Карно, Даламбера и Монжа.

В 1930-е гг. по важности технических применений одно из первых мест заняла механика сложной среды. В области теории упругости Н. И. Мусхелишвили (1891–1976) и его ученики исследовали плоскую задачу при помощи методов теории функции комплексного переменного.

В это же время возникают и комплексные проблемы, относящиеся одновременно к строительной механике, теории упругости и теории устойчивости, например, проблема устойчивости упругих систем, теория стержневых систем. А. Н. Крылов занимался строительной механикой корабля. Его работа «О расчете балок, лежащих на упругом основании» (1930) стала важным вкладом в строительную механику. Во второй половине 1930-х гг. В. М. Майзель начал исследования в области термоупругости, которые продолжил А. Д. Коваленко.

Развитие в XX в. строительства, в частности, железнодорожного, дорожного, стимулировало проведение исследований в области механики сыпучей среды и механики грунтов. Последняя возникла на базе теории упругости, теории сыпучих тел и гидромеханики, т. е. механика грунтов развивалась как наука на стыке ряда направлений механики и физических теорий. Несомненны научные заслуги в этой области Н. М. Герсегонова, который выяснил условия совместной работы деформируемых оснований и возводимых на них сооружений.

В 20–30-е гг. XX в. появилась теория фильтрации как направление, связывающее идеи теории грунтов и гидродинамики. Непосредственной причиной создания теории фильтрации стали проблемы гидротехнического строительства, а также эксплуатации нефтяных месторождений. Впервые задачи фильтрации были сформулированы Н. Е. Жуковским и австрийским ученым Форхеймером, а также другими учеными из разных стран.

В 1930-е гг. началась разработка механики материалов и теории их прочности. Из-за больших объемов строительных работ, развития новых отраслей машиностроения (авто- и авиастроение, транспортное и др.) существовала острая необходимость в металле все более высокого качества, кроме того, требования, предъявляемые

к строительным и машиностроительным материалам, определили поиски новых материалов с заранее заданными свойствами. Появляются и новые методы обработки металлов, важнейшим из них стала электросварка. Основоположителем сварки в СССР был выдающийся мостостроитель Е. О. Патон (1870–1953). Метод соединения элементов металлоконструкций с помощью сварки стал лишь одним из практических выводов прикладной механики.

Во второй половине XX в. меняются интересы исследователей, работавших в разных направлениях механики. Интересы эти в значительной степени оказываются обусловленными практическими задачами, поэтому в аналитической механике интенсивно изучаются динамика полупеременной массы, неголомомная механика, теория гироскопов. Существенное развитие получает нелинейная механика, занявшая важное место в исследованиях колебательных процессов; идеи теории колебаний пересеклись едва ли не со всеми направлениями прикладной механики. Развиваются динамика машин, теория машин автоматического действия. На стыке идей алгебры, биомеханики и теории регулирования возникает новая наука – кибернетика, основоположником которой стал Норберт Винер (1894–1964). При создании кибернетики были использованы идеи многих ученых, в частности А. Н. Колмогорова.

С началом научно-технической революции (50-е гг. XX в.) резко меняется и тематика научных исследований, и их темпы. Одной из характерных особенностей НТР является то, что наука становится непосредственно производительной силой: она вызывает к жизни технические решения, определяет появление новых отраслей техники, новых видов производств. Как подчеркивает А. Н. Боголюбов, автор книги «Механика в истории человечества», в ее развитии теперь преобладает интегральный путь, когда новое направление возникает на стыке других, зачастую весьма разнородных.

Древнейшим из учений механики, как известно, являлось учение о покое – статика; учение о движении возникло значительно позже. Затем появилась теория колебаний, и уже в XX в. – теория устойчивости. С точки зрения объекта исследования можно различать механику микромира, механику среды, механику твердого тела

и системы тел, небесную механику. Некоторые разделы механики развились в самостоятельные научные направления, в частности, это механика тела переменной массы, неголономная механика, теория гироскопов. К механике сложной среды относятся такие научные дисциплины, как сопротивление материалов, механика материалов, теория упругости, теория пластичности, гидравлика, гидродинамика, аэродинамика, механика. И практически все это – XX в. Именно в XX в. происходит окончательное становление науки механики. Уточняя объект исследования, развивается строительная механика, механика машин, механика корабля, механика самолета, баллистика, механика ракетного движения, механика живых организмов, биомеханика. А. Н. Богомолов, большой знаток истории механики и автор многих работ в этой области, утверждает, что все эти науки постоянно взаимодействуют, дробятся и порождают новые направления: «...статистическая классификация наук теперь просто невозможна, поскольку науки находятся в непрерывном развитии» [11, с. 27]. Исследования последних лет в механике в целом и в отдельных ее отраслях проводятся в наибольшем приближении к реальным условиям, поэтому многие работы в области, скажем, теории упругости пересекаются с исследованиями по механике машин, гидродинамике, строительной механике, теории пластичности и даже геометрии (работы А. В. Погорелова).

Современная НТР вызвала к жизни и множество новых технических проблем. Пути механики часто пересекаются с искусством. Много общих задач у механики с архитектурой и скульптурой. Живопись внесла важный вклад в создание начертательной и проективной геометрии, что оказало влияние на развитие едва ли не всех отраслей механики. Сегодня механика, как и другие науки, все в большей степени становится делом не отдельных ученых, а целых научных коллективов, в отличие от XVII–XVIII вв., когда достижения были индивидуальными, одиночными. К концу XIX в. появляются научные коллективы, сначала небольшие; к середине XX в. число таких коллективов растет, а с ним растет и объем исследований. Все больше расширяется диапазон исследований механики, она «вклинивается» в биологию, геометрию, другие естест-

венные науки, в искусство, позволяет успешно решать инженерные задачи, вооружает инженеров научной основой для их плодотворной деятельности.

2.4. Развитие инженерной деятельности

С древних времен люди нуждались в строительстве мостов, каналов, гаваней, дорог и т. д. [11]. Людей, занимающихся решением этих проблем, называли инженерами. Они конструировали большие дренажные системы, фортификационные сооружения, проектировали, руководили созданием и эксплуатацией военных машин. Вместе с тем их труд в то время был весьма далек от труда ученого, мудреца. Их труд основывался не на теоретических знаниях, а был продуктом интуиции и опыта. Инженерное дело занимало промежуточное положение между трудом ремесленника и ученых. Как же зарождалось инженерное дело, как шел процесс становления профессии инженера на Руси?

Слово «инженер» в русских источниках впервые встречается в середине XVII в. в «Актах Московского государства». Есть сведения, что попало оно в Русское государство из немецкого и французского «ingenier».

Массовая инженерная деятельность на Руси возникает и конституируется лишь тогда, когда в ремесленном производстве намечается отделение умственного труда от физического. Как и везде в целом, исключительной функцией инженера в Древней Руси следует считать интеллектуальное обеспечение процесса создания техники и различных сооружений.

Вместе с тем истоки инженерного искусства на Руси уходят в глубь веков. История славянских народов свидетельствует, что еще в VI в. славянское войско в войне с Византией использовало сложные осадные машины (железные тараны, катапульты для метания камней, «черепахи»). Так, при обороне Доростола в 971 г. ими успешно использовались укрепления, возведенные в короткие сроки. Еще до прихода на Русь первых инженеров-строителей имелись

хорошо укрепленные города: Чернигов, Киев, Новгород и др. Самобытное русское лицо запечатлено в мировых творениях Пскова, Ростова, Суздаля, Владимира и иных городов, которых с древнейших времен у нас было столь много, что и норманны, и арабы еще на заре нашей истории называли Русь Гардарикой – «страной городов».

В истории Руси есть немало имен русских мастеров, владевших собственными приемами в области строительной механики. Именно об этом говорят сооружения, возводившиеся такими зодчими, как новгородец Арефа и киевлянин Петр Милонег в XII в., каменных дел мастер Авдей – в XIII в., Кирилл и Василий Ермолин, Иван Кривцов, Прохор и Борис Третьяк и др. Так, Петр Милонег построил на берегу Днепра такую замечательную стену, что современники о ней говорили как о великом чуде.

Истории неизвестно, были ли до времени княжения Ярослава Мудрого строители особой группой, получая плату за свою работу, или инженерные сооружения производились местными жителями. Но уже в XI в. занятие строительством приобретает статус профессии. Строителей оборонительных сооружений именуют «городники», «мостники», «мастера порочные».

Обязанность первых заключалась в строении городских стен, «мостники» выполняли работу, состоявшую в устройении различного рода переправ. «Порочными мастерами» назывались специалисты по постройке и эксплуатации осадных машин. Они всегда находились при войске, чинили старые и делали новые военные машины.

Упоминаются в летописях XII в. имена многих мастеров, литейщиков. Так, встречается имя воеводы Бориса Жидиславовича, который участвовал во многих осадах, управляя стенобитными орудиями. Известны имена посадника Павла и розмысла Александра, построивших много укрепленных городов. Термин «розмысл» появляется в летописях времен царствования Ивана IV как прозвание иноземца, принимавшего участие в осадных и подземных работах при осаде Казани в 1552 г. Вместе с тем следует сказать, что оно встречается и раньше и, по всей видимости, означает специалиста по военно-инженерному делу (крепостному, осадному и др.).

Необходимо отметить, что влияние иностранных специалистов, в том числе на военно-инженерное дело, было крайне ничтожным. Но со второй половины XV в. Иван III начал выписывать из-за границы искусных строителей. Так, в 1473 г. был послан в Италию Семен Толбузин для приискания там знающего зодчего. Он привез с собой знаменитого архитектора Аристотеля Фиораванти, который возвел несколько храмов, каменных палат, башен, а также участвовал в ряде военных действий русской армии. В 1482 г. в Венгрию был послан дьяк Федор Курицын с целью доставки в Россию художников, умеющих лить пушки и стрелять из них, и розмыслов, или инженеров. В 1490 г. из Италии приехали в Москву архитектор Петр Антоний с учеником, пушечный мастер Яков, в 1494 г. – знаменитый стенной мастер Алевиз и Петр-пушечник. В 1504–1505 гг. прибыло еще много итальянских зодчих и пушечных мастеров. Каждый из них обязывался отслужить определенный срок за известную плату.

Приглашение из-за границы мастеров имело большое значение, но решающим факторам не являлось. Импорт мастеров во многом способствовал прогрессу в инженерном деле, так как Италия славилась военной архитектурой. Естественно, что приглашенные инженеры и архитекторы сыграли заметную роль в истории русского инженерного дела, способствовали становлению на Руси инженерной профессии. Но свои, отечественные умельцы могли и делали свое дело мастерски, с инженерным размахом. Строители многочисленных русских крепостных стен умели так подбирать соотношение высоты и толщины стен, что они отлично и чрезвычайно долго держались без применения каких-либо боковых подпорных сооружений-контрфорсов. Лучшие мастера-строители умели избегать лишних запасов прочности.

Современные инженеры, архитекторы приходят в изумление от точности практического расчета древних строителей церкви Вознесения в селе Коломенском под Москвой, достигающей в высоту 58 м.

Как выдающийся памятник инженерной мысли у стен Кремля в Москве стоит храм Василия Блаженного, сооруженный великим

псковским зодчим Бармой вместе с русским мастером И. Постником. Это поистине произведение искусства, архитектуры и инженерной мысли. Объединив в едином храме девять отдельных церквей, они создали изумительную архитектурную гармонию, воедино сочетали конструктивные и художественные формы, удивительно правильно подобрали отдельные элементы, допуская только необходимую толщину стен и перекрытий, вводя возможно меньшее количество материалов и вместе с тем обеспечив должную монументальность своему творению.

Документы сохранили имена многих крупных организаторов уникальных строительных работ, которым придавали исключительное внимание выдающиеся государственные деятели Древней Руси и более позднего времени – княгиня Ольга, Владимир Святославович, Ярослав Мудрый. Золотые ворота в Киеве, окруженные валами в 14 м, заложенные Ярославом, Софийский собор в Киеве, построенный в 1037–1054 гг. греческими и русскими мастерами, София Новгородская, построенная сыном Ярослава Мудрого, собор Спаса в Чернигове, строительства второй половины XIII в. в Луцке, Хотине, Кременце и других городах Галицко-Волынской земли, где активно шло сооружение каменных замков, праздничных храмов – церкви Успения и Ивана Предтечи в Холме, Николая – во Львове, храма Иоанна Богослова в Луцке и др. – далеко не полный перечень строений, требующих не только опыта, но и глубоких знаний, таланта зодчего и математика.

Не вызывает никаких сомнений, что у таких строителей был не только опыт, но и глубокий и трезвый расчет и какое-то своеобразное, основательное знание основных принципов механики, позволившее им отлично разрешить задачи строительной механики, решение которых сделало бы честь и современному инженеру-строителю, вооруженному, в отличие от древних строителей, обширным справочным, печатным арсеналом, различными ЭВМ и другой техникой.

Своеобразные знания, относящиеся к области механики, возможно никогда и не писанные и вряд ли имеющие по форме что-либо общее с нашими привычными расчетами и дифференциаль-

ными уравнениями и их интегрированием, проявились и во многих других творческих делах Древней Руси.

Более трехсот лет тому назад русские пищальные художники, или «хитрецы очистного боя» – оружейники решали сложнейшие задачи в области практической механики. Кстати, эти задачи порой оказывались посильными для Западной Европы только в XVIII–XIX столетиях.

Старинные записи говорят, что пушки и порох на Руси были известны многие сотни лет назад. Так, Ипатьевская летопись, относящаяся к 1261–1291 гг., свидетельствует, что на Руси уже тогда были огнестрельные орудия: «самострелы», «тюфяки», «пускачи», «пушки». О том, что в последние годы княжения Дмитрия Донского войска были вооружены пушками, повествует также Голицынская летопись.

Свыше ста лет назад на Дону было найдено старинное орудие. Ученые относят его к XIV–XV вв. Ствол пушки – кованый, скрепленный для прочности железными кольцами. Лафетом служила массивная дубовая колода. Но что самое интересное – заряжалась эта пушка не с дула, а, подобно современным орудиям, с казенной части. Здесь было расположено специальное оригинальное устройство, запиравшее канал ствола во время выстрела. Ныне эта русская пушка, одна из немногих, сохранившихся от тех далеких времен, находится в артиллерийском музее.

В XV в. на территории Российского государства производилась и отливка орудий. Это производство наладили русские колокольные мастера – первоклассные литейщики, прекрасно освоившие технологию производства.

Знаменитый Пушечный двор в Москве, созданный в 1478 г., где сосредотачивалось производство пушек, был одним из крупнейших арсеналов. Литейщики Пушечного двора не только создавали первоклассные по тем временам орудия, но и славились как замечательные художники литья. Дошедшие до наших дней орудия и их выделки украшены прекрасными барельефами, изображающими различные фигуры и целые сцены.

Эти литые пушки, подобно нынешним кораблям, имели каждая свое название. Пушки «Волк», «Гамаюн», «Единорог», «Лев» были названы в честь изображений, отлитых на их телах. «Богдан» и «Тимофей» несли на себе имена создателей – мастеров-оружейников. Одними из первых литейщиков пушек, имена которых дошли до нас, запечатленные на бронзе орудий, были два Якова. За ними в истории нашей артиллерии оставили след «Яковлевы ученики Ваня и Васюк», а затем два знаменитых пушечных мастера – Семен Дубинин и Андрей Чохов. А. Чоховым в 1585 г. была отлита известная Царь-пушка, находящаяся ныне в Кремле. Поразительны ее размеры: диаметр канала ствола 89 см, длина ствола свыше 5 м. Предназначалась эта пушка для стрельбы картечью. На стволе гигантской пушки отлита надпись: «Делал пушку пушечный литец Ондрей Чохов». Царь-пушка – памятник высокой конструкторской и технологической культуры старинных русских техников.

Об умении рассчитывать, соблюдая основные требования механики, свидетельствуют скорострельные пушки, называемые «органными орудиями», создаваемые русскими умельцами, в том числе стовольное орудие, которое делал Андрей Чохов. «Орган», изготовленный механиком А. Нартовым, состоял из 44 бронзовых мортирок, укрепленных на вращающемся барабане лафета. Эти и другие примеры свидетельствуют, что на Руси инженерная мысль имеет глубокие корни и была достаточно развитой.

Свидетельством этого является и умение подбирать компоненты и лить отменные колокола, в том числе гигантские, строить многочисленные уникальные мельницы. Последних было много на Руси. Строительство мельниц было столь обычным явлением, что описанием их устройств занимались мало. Их строили и строили множество. Упоминание о водяных мельницах можно встретить в документах еще XIII в. Умение строить мельницы было перенесено русскими поселенцами за Урал и на Восток, в Сибирь.

Русская инженерная мысль разорвала узкий круг применения водяного двигателя, ограниченного переработкой сельскохозяйственных продуктов: мукомольные мельницы, крупорушки, сукно-

вальни. Документы показывают, что в XVI в., в районе Вычегды, на речке Лахоме, действовала железоплавильня с плотиной и водяным колесом, приводившим в движение молот дляковки железа – «самоков», в 60-х гг. XVI в. под Москвой водяное колесо начало приводить в действие установку для производства бумаги – бумажную мельницу. Условия для строительства плотин, мельниц были такими неодинаковыми, что переносить откуда-либо технику плотиностроения в своеобразные физико-географические условия Русского государства было нецелесообразно. Строителям первых вододействующих промышленных предприятий пришлось опираться на опыт русских «водяных» людей (так назывались строители водяных мельниц, плотин), выработавших свою своеобразную технику и технологию сооружения уникальных земляных плотин.

Особенно интенсивно идет этот процесс в петровское время. Сотни русских, в том числе горнозаводских, водных колес и плотин стояли столетия и действовали еще в первой половине XX в. в Екатеринбурге, Нижнем Тагиле, Первоуральске, Ревде, Горной Колывани, Змеиногорске, Туле, Сестрорецке и в иных местах.

Проявили недюжинные инженерные таланты такие строители, как Михаил Иванович Сердюков, который сделал то, что оказалось не по плечу амстердамским инженерам, создавший Вышневолоцкую систему шлюзов для соединения Волги с бассейном Балтики (1722), Михаил Михайлович Самарин показал себя гениальным инженером-строителем при сооружении кронштадтских доков и каналов, Григорий Скорняков-Писарев – при работах на Ладожском канале.

Русский народ вынес на своих плечах огромный труд, сооружая плотины, которые требовали строгих инженерных расчетов, постройки для многочисленных предприятий, появляющихся в результате усилий Петра I по преобразованию России. Основным заводским двигателем было водяное колесо, для действия которого необходимо было сооружать заводскую плотину, требовавшую огромных затрат труда, уникальных расчетов, чем все собственно заводские сооружения.

Документы также повествуют о том, что на Руси издревле умели создавать «колокола дивны слышанием». Чтобы отлить колокола, необходимо обладать знаниями и навыками, соблюдать пропорции в сплавах, знать температурные режимы, технологию изготовления колоколов с определенными заданными свойствами. Кроме отливки колокола, решались сложнейшие механические задачи: поднятия на большую высоту отливки из цветного металла, крепление и т. д.

Еще при Борисе Годунове русские мастера отлили в Москве колокол, диаметр нижней части которого составлял около пяти с половиной метров при общем весе свыше 35 т. Более двадцати человек требовалось для обслуживания его во время торжественного благовеста. Во время одного из пожаров он упал и разбился. В 1654 г. его успешно перелили, создав восьмидесячепудовый Царь-колокол. После долгого хранения на земле (девять месяцев) его подняли и с 1668 по 1701 г. по Москве раздавался его благовестный звон. Для приведения в движение языка колокола требовалось, по свидетельству иностранцев, сто человек. После пожара в Кремле (19 июня 1701 г.), когда сгорели связи, на которых держался колокол, он опять падает и разбивается. В 1731 г. было решено воссоздать Царь-колокол весом девять тысяч пудов. Пригласили мастеров из-за границы, в частности, известного парижского мастера Жермена, но он принял за шутку предложение изготовить такой гигант.

То, что казалось невозможным зарубежным техникам, выполнили русские мастера – отец и сын Иван Федорович и Михаил Иванович Моторины, которые, после нескольких неудач, 23 ноября 1735 г. отливают колокол весом 12 327 пудов 19 фунтов, т. е. 200 т – самый большой в мире колокол. Для сравнения за рубежом колокола весили: в Бейпине – 55 т, японский в Киото – 63 т.

При кремлевском пожаре 1737 г., когда колокол еще находился в яме, загорелось прикрывавшее его деревянное строение. Пылающие бревна падали в яму. Сбежавшийся народ, опасаясь, что колокол расплавится, начали заливать его водой. Видимо, из-за неравномерного охлаждения откололся кусок в его нижней части. Столетие колокол пролежал в земле, а в 1836 г. его установили на место,

где он теперь и стоит в Кремле (в качестве памятника выдающемуся мастеру и его мастерству).

Русские мастера не только отливали тяжелейшие колокола, но и успешно решали задачи их подъема и установки на место. Так, древние двухтысячепудовые колокола «Сысой», «Полиелейный», поднятые на колокольную ростовского собора, издавна известны своими голосами, четырехтысячепудовый колокол Успенского собора в Московском Кремле называют Большим, и он славится своим звоном.

Умело сочетая отечественный и зарубежный опыт, русские техники еще в древние времена ярко показали мастерство в подъеме огромных тяжестей, в сооружении различных механических установок, мельниц, а также в строительстве и артиллерийской механике. Опыт, навыки, знания, запечатленные в этих делах, столь своеобразны по своему существу и столь примечательны, что дают право сказать: русская инженерная мысль была способна решить сложнейшие проблемы механики.

В XVI в. русское военно-инженерное искусство в некоторых направлениях обогнало западноевропейское. Так, в 1552 г. при третьем походе на Казань русские воины показали высокое мастерство инженерной атаки: «Здесь зарождался метод параллели, т. е. сближение средств осады с объектами атаки путем проведения траншейных работ и последовательного переноса огневых позиций артиллерии. Этот метод теоретически был обоснован С. Вобаном во второй половине XVII в.» [2]. Руководил осадой Казани талантливый русский розмысл дьяк Выродков.

Следует заметить, что в то время уже в Германии военные архитекторы начали называться инженерами, и этот термин для обозначения военной специальности был завезен, по-видимому, из Германии мастерами, у которых были дипломы инженеров. Но это слово утвердилось в русском языке не сразу. Еще долгое время их обозначали русскими названиями, являющимися переводами с иностранного «ingenier». В официальных документах той поры чаще встречаются названия «горододельцы», «городовые смышленники», «муроли». Только очень немногие иностранные специалисты

сохранили в России звания «инженер», и именно они положили начало его распространению на Руси, в Московском государстве.

Официально так стали называться специалисты по военному строительству при царе Алексее Михайловиче. Причем это звание давалось только иностранцам. Фактически русских инженеров в истинном смысле этого слова не существовало вплоть до XVIII в.

В период царствования Ивана Грозного военные строители начинают разделяться на разряды: 1) к высшему разряду принадлежали военные архитекторы – систематики, занимающиеся преимущественно усовершенствованием оборонительной части; 2) ко второму – собственно строители, руководившие сооружением укреплений; 3) к низшему разряду – все остальные строители: каменных, стенных, палатных дел мастера и муроли.

Коренные преобразования в инженерном деле произошли в связи с нарастанием тенденций централизации и созданием единого Русского государства. С того времени все военное строительство и изготовление военной техники поступили в ведение Пушкарского приказа, основанного в царствование Ивана IV. Круг действия приказа по инженерной части состоял в объединении указов о постройке новых и исправлении старых оборонительных сооружений; составлении инструкций воеводам, руководившим военным строительством; составлении инструкций воеводам, руководившим осадой или обороной крепостей; определении смет для сооружения укреплений; в проверке отчетов.

Вследствие создания Пушкарского приказа постройка оборонительных сооружений сделалась менее произвольной, появились установленные стандарты: инструкции и чертежи, составленные в приказе. Начали распространяться и так называемые городские «строельные» книги, заключавшие в себе подробное описание оборонительных оград. При Пушкарском приказе числились: а) инженеры, или иноземные строители, которые выступали чаще всего экспертами или консультантами: они рассматривали проекты, присылавшиеся с места сооружения, или сами их составляли. Кроме того, они выезжали на строительство с инспекционной комиссией; б) городовые мастера – большей частью русские строители, находя-

щиеся постоянно в крупных городах. Они рассматривали сметы, которые присылались строителями в Пушкарский приказ, а также непосредственно руководили строительными работами; в) мастера и подмастерья – были низшими разрядами строителей, помощниками городских мастеров и осуществляли непосредственный надзор за производством работ; г) для осуществления чертежных работ была создана особая категория «чертежников».

Несмотря на значение, которое придавалось инженерному делу, Пушкарский приказ был единственной организацией, регулировавшей отправление инженерных функций. Идея специального образования для отечественных инженеров еще не являлась в ту пору распространенной и не рассматривалась всерьез. Хотя Иван Грозный сделал определенный шаг вперед в развитии инженерного дела, все же он, как и его предшественники, основным способом удовлетворения потребности в специалистах избрал их вывоз (приглашение) из европейских стран, главным образом из Германии, Голландии и Англии.

При Василии Шуйском (1552–1612) было положено начало некоторому теоретическому образованию русских инженеров: в 1607 г. был переведен на русский язык «Устав дел ратных», в котором, кроме правил образования и разделения войска, действий пехоты, рассматривались и правила сооружения крепостей, их осады и обороны. Своеобразную роль учителей инженерного дела в русской армии взяли на себя шведские офицеры. Инженерные работы производились, как правило, наемными людьми, набираемыми из дворян, боярских детей и дьяков. Все они получали денежное и натуральное жалованье.

По социальному происхождению первые русские инженеры принадлежали чаще всего к служилому сословию. Высший инженерный состав – воеводы, полковники, головы и другие офицеры – были выходцами из московских или городских чинов «служилых по отечеству».

Иностранные инженеры, находящиеся на русской службе, как правило, имели чин полковника. Низшие разряды русских инженеров принадлежали к служилому сословию, к городским чинам,

несущим «осадную службу» в провинциях. Кроме того, имелись ремесленники, знавшие инженерное дело, они относились к разряду служилых людей «по прибору», в котором выделялись разряды пушкарей и затинщиков (т. е. работников, обслуживающих осадные орудия – «затинные пищали»), а также другая артиллерийская прислуга.

Эпоха коренных преобразований в инженерном деле связана с именем Петра I. Почти непрерывные войны, сопровождавшие его царствование, сделали необходимым развитие как военного искусства вообще, так и инженерного в частности. Недостаток просвещения теперь стал главным препятствием к успешной подготовке русских инженеров. Основной же целью преобразовательной деятельности Петра I было дать возможность России стать самостоятельной развитой державой и обходиться по возможности без иностранцев. Именно это и послужило причиной основания корпуса собственных, русских инженеров.

Многочисленные войны, проводимые Петром I, со всей отчетливостью показали все недочеты и прорехи в инженерном деле того времени. Боевая тактика осадной войны сводилась в основном к блокаде, при которой инженерные работы либо отсутствовали, либо велись в весьма ограниченных размерах.

Сложная осадная техника в XVII в. практически не использовалась. Основным инструментом завершающего приступа была лестница. Удача при осаде основывалась главным образом на мужестве и храбрости войска, а не на искусстве инженеров.

Командование шло на большие людские потери при штурме, так как не было ни хороших руководителей осад, ни эффективной осадной артиллерии. Сказывался и недостаток теоретических познаний по инженерной части. Несмотря на то, что к началу XVIII в. при русской армии служило множество иностранных инженеров, потребность в знающих специалистах не была удовлетворена. Иностранцы чаще всего использовались как инженеры-строители и администраторы, но ни один из них не приобрел известность как военный инженер. Нередко инженерные обязанности при осадах исполняли артиллерийские обер- или унтер-офицеры, а при армии –

кто-либо из офицеров штаба, имевших познания в инженерном искусстве.

Первым шагом в распространении инженерных знаний среди русских было направление молодых дворян за границу с целью изучения там архитектуры, корабельного искусства и инженерного дела.

Петр I сразу по возвращении из своего первого путешествия по Европе приступил к учреждению учебного заведения, получившего название Школы математических и навигационных наук (1708). В число предметов, преподававшихся в школе, входили арифметика, геометрия, тригонометрия, а также их практическое применение в артиллерии, фортификации, геодезии, мореплавании.

В 1712 г. открываются первая, а в 1719 г. – вторая инженерные школы, куда начали поступать дети из знатных русских фамилий. В числе первых слушателей были князь Мещерский, граф Гендриков, князь Вяземский и др. Московская и Петербургская школы находились в ведении немецких инженеров, преподавание велось, как правило, на немецком языке. Выпускникам школ присуждалось звание кондуктора, а в дальнейшем инженера-прапорщика.

В инженерных школах петровского времени курсы преподавания не утверждались сверху. Многое зависело от заведовавшего школой офицера. Если один из них по собственному усмотрению вводил в курс новый предмет, то другой, приходявший на смену, мог исключить его. К числу таких необязательных дисциплин относились архитектура, геодезия и другие предметы, необходимые для несения службы офицера инженерных войск.

Качество образования в этих первых инженерных школах не удовлетворяло даже тем скромным требованиям, которые предъявлял XVIII в.

Юноши, посвятившие себя военно-инженерному делу, получали в основном теоретическую, математическую подготовку, дальнейшее же образование по инженерной части им приходилось получать практическим путем, в ходе службы в звании кондукторов. И все же эти первые шаги инженерного образования дали свои плоды: во-первых, повышался образовательный уровень людей

военного звания, а во-вторых, постепенно складывался круг образованных инженеров русского происхождения.

Кроме специализированной подготовки военных инженеров, Петр I в 1713 г. издал указ о том, что все офицеры в свободное время должны обучаться инженерству. Таким образом, число русских технических специальностей мало-помалу росло, что привело впоследствии к образованию инженерного корпуса. Датировать его возникновение довольно трудно. Но мы будем считать первым официальным доказательством существования инженерных чинов штатное положение о полевой артиллерии от 1712 г., согласно которому она имела структуру: 1) генеральный штаб, к нему принадлежали лица Главного управления артиллерии и фортификационной части; 2) полк в составе двух команд инженеров и понтонеров.

Состав инженерной команды был следующим: два капитана, два капитан-поручика, два поручика, два подпоручика, 24 кондуктора, пять батарейных мастеров. Малочисленность инженерной команды и дефицит высших чинов, которым можно было бы вверить управление инженерной частью, были причинами первоначального присоединения инженеров к армии. Кроме того, некоторая часть инженеров состояла на службе при военной канцелярии. В 1722 г. вышло определение военной коллегии, в котором говорилось, что в каждом полку должны быть свои инженеры: один обер-офицер и два кондуктора. Инженерам выплачивалось жалованье в размере 300 руб. в год, что равнялось жалованью обер-комиссара, но в два раза меньше жалованья майора.

В 1723 г. инженерная и минерная роты были слиты, а в 1724 г. Петр I приступил к формированию инженерного полка, в котором инженеры были разделены на два разряда: полевых и гарнизонных. Эти факты свидетельствуют о том, что численность инженеров в то время была уже довольно значительной, а круг действий вполне определен. Именно с того времени можно считать, что военно-инженерная профессия перешла на свою институциональную стадию, опередив гражданскую специальность где-то на 100 лет. Следует заметить, что развитие профессии инженера в военной сфере России отставало примерно на 60 лет от европейских темпов.

А как же обстояло дело с применением инженерного труда в гражданских областях?

Вплоть до петровского времени Русь была страной кустарной промышленности. Существовавшие заводы были чаще всего небольшими домашними заведениями. Наиболее крупными в то время являлись оружейные, литейные и суконные предприятия (т. е. отрасли, которые обслуживали армию). Но в целом, если не считать единичных попыток иностранцев основать на Руси фабрики и заводы в XVI–XVII вв., до Петра I фабричной промышленности не было.

Инженерные функции на заводах и фабриках петровского времени вменялись в обязанности определенной категории работников. Гражданских инженеров в современном смысле слова не было. Основной рабочей массой были посессионные крестьяне, приписываемые к фабрике, кроме того, на заводах работали под караулом преступники, солдаты, военнопленные. Такой контингент рабочей силы характеризовался низкой производительностью труда, отсутствием навыков для тщательной и тонкой работы, незаинтересованностью в результатах своего труда. Но кроме этой, часто недисциплинированной и неквалифицированной массы, на фабриках имелись мастера, знавшие технологию производства и, по существу дела, объединявшие в своем лице и инженера, и квалифицированного рабочего, и ремесленника.

К примеру, на Липецком металлургическом заводе, основанном в 1712 г., были такие мастера-руководители: плотинного и мехового дела; доменного, пушечного и сверляного дела; «ложного» дела мастера; «ружейные заварщики», руководившие выработкой стволов, «ружейные мастера», «ружейного дела замочные отделщики» и т. п.

Если судить о структуре фабричных работников по таблице «Геннина», составленной в 1723 г., то можно сделать вывод, что на металлургическом заводе XVIII в. на одного обученного мастера приходилось 25–35 неквалифицированных или полуквалифицированных работников.

Простой надзор осуществляли «сторожа», а мастера контролировали технологию производства. Кроме того, при заводе имелись

управление и канцелярия, причем численность конторских служащих составляла везде примерно 10 % к общей численности промышленно-производственного персонала. Самым крупным предприятием первой четверти XVIII в. был Сестрорецкий оружейный завод, на котором работало более 600 человек (крупным в то время считалось предприятие со 100 работающими).

В XVIII в. состоялось окончательное прикрепление мастеровых к фабрикам, что тормозило рост производительности труда и улучшение качества товаров. Отсутствие необходимой для развития капитализма свободы предпринимательской деятельности сказывалось и на инновационной активности.

Изобретения делались преимущественно следующими группами лиц: самими фабрикантами, стимулируемыми к усовершенствованиям погоней за прибылью, а также изобретателями-самородками, которые в силу своего природного дарования кустарным образом изготавливали «диковинки», различные автоматы и механические безделушки для придворных развлечений.

Первое время после смерти Петра внутренняя политика шла по той же колее: поощрялось устройство новых фабрик предоставлением фабрикантам привилегий, денежных ссуд, припиской к фабрикам крестьян и мастеровых. При Екатерине II промышленная политика постепенно проникается духом предпринимательской свободы и поощрения частной инициативы. Многие привилегии уничтожаются, дается право открывать фабрики крестьянам (1762), отменяется требование получения разрешения на их открытие (1775), ликвидируется главный орган промышленной регламентации – Мануфактур-коллегия (1785). Если в первой половине XVIII в. крупное производство развивалось весьма медленными темпами, то начиная с 60-х гг. это развитие происходило с нарастающим ускорением. За годы царствования Екатерины II число фабрик и заводов увеличилось более чем вдвое. Все это обуславливало необходимость наличия людей, способных решать возникающие технические проблемы, знающих технологии, умеющих заниматься разработкой техники и создавать ее.

2.5. Становление отечественных инженерных наук

Еще в глубокой древности Русь славилась своими умельцами – литейщиками, оружейниками, ювелирами, строителями ветряных и водяных мельниц. Материалы археологических раскопок показывают, что уже в VIII в. наши предки применяли токарную обработку. В период Киевской Руси еще совершеннее становится техника ремесел. Славилась, в частности, своей добротностью проволока, изготовленная мастерами, искусно владевшими техникой волочения.

Средневековые русские мастера умели делать сложные механические устройства – часы, хитроумные замки, сверлильные и токарные станки, станки для чеканки монет, ткацкие станки, самопрялки, копры для забивания свай, подъемные сооружения, лесопильни. Русские мастера искусно поднимали на высокие башни огромные колокола.

Опыт, накопленный русскими ремесленниками, создал благодатную почву для развития теории накопления практических знаний.

Отечественные ученые внесли много ценного в разработку теории машин, механизмов, строительных конструкций. В отечественных древних книгах на эту тему излагались знания, накопленные русскими и иностранными мастерами в практической деятельности. Можно упомянуть, например, вышедшее на рубеже XVI–XVII вв. руководство по бурильной технике «Роспись как зачать делать новую трубу на новом месте» (1620). Много ученых сведений по технике содержал знаменитый «Устав ратных, пушечных и других дел, касающихся воинской науки». Автором этой книги был выдающийся деятель русской техники XVII в. Онисим Михайлов (предшественницей «Устава» была «Воинская книга», напечатанная Михаилом Юрьевым и Иваном Фоминым). Большая часть книги посвящена артиллерии и фортификации. Однако в «Уставе» разбирается и много общетехнических вопросов. Замечательно, что в книге изложение технических вопросов основано на данных математики.

Много сочинений, посвященных технике, появилось во второй половине XVII в.

В начале XVIII в. в России стали появляться сочинения, написанные уже специалистами-учеными. Одним из таких ученых был Г. Г. Скорняков-Писарев, выпустивший в 1722 г. книгу «Наука статическая, или Механика» – первый русский труд, посвященный специально механике. В 1738 г. вышла в свет книга «Краткое руководство к подписанию простых и сложных машин, сочинение для употребления российского юношества». То был перевод с латинского языка (на котором в те времена писались научные труды) сочинения петербургского академика Крафта. Перевод был сделан адъюнктом Академии наук В. Е. Адодуровым. Книга эта послужила источником знаний для нескольких поколений русских механиков. Примечательна эта книга еще тем, что в ней впервые шла речь о машиноведении как об отдельной науке, а не только как о разделе физики.

Во второй половине XVIII в. появляется новый оригинальный учебник механики, написанный русским автором. Эта книга, изданная в 1764 г. Яковом Козельским, называлась «Механические предложения для употребления обучающегося при Артиллерийском и Инженерном шляхетном кадетском корпусе благородного юношества». Ценные учебники по механике и сопредельным научным дисциплинам написали Д. С. Аничков, Н. Г. Курганов, Е. Д. Войтеховский.

Русскими учеными и исследователями были решены важные вопросы машиностроения. Так, Леонард Эйлер выводит знаменитую формулу (1765), которая дает возможность по коэффициенту трения определить основные конструктивные элементы механизма с гибкими звеньями. Эта формула является только составным звеном общей теории трения. Эйлер занимался изучением трения в течение многих лет, продолжая исследования трения в машинах и механизмах. Первый труд, посвященный трению в машинах и механизмах, был издан в Петербурге в 1727 г. Л. Эйлер необычайно углубил теорию трения и придал ей математически совершенный вид. В своем классическом сочинении «Механика» он успешно решил вопросы механики методом математического анализа. От этой

книги идут, как признают ученые, пути дальнейших поисков в области аналитической механики.

В 1760 г. Эйлер выпустил в свет труд «О движении твердого тела». В этом сочинении, как писал академик А. Н. Крылов, «вопрос о составлении дифференциальных уравнений получил полное и окончательное решение, которым пользуются и до сих пор» [11, с. 49].

Следует еще раз сказать, что в богатом наследии Эйлера – им оставлено 865 трудов – многое посвящено механике. Эйлер был не только ученым-теоретиком, но занимался и чисто инженерными делами, проверкой качеств насосов и чувствительности весов для взвешивания монет, принимал участие в экзаменах «машинных дел подмастеров».

Говоря о вкладе отечественных ученых в развитие и становление механики, инженерного дела, нельзя не остановиться на вкладе М. В. Ломоносова в решение названных выше проблем. Исходим мы здесь не из традиционного подхода оценки Ломоносова как величайшего русского ученого, а из его конкретного вклада в механику, в инженерное дело.

Понимая огромную важность «приборного искусства» для создания машин и механизмов, Ломоносов изобрел ряд специальных устройств и приборов: машины для испытания материалов на твердость, инструмент «для раздавливания и сжимания тел», с помощью которых он исследовал прочность различных материалов. В лаборатории Ломоносова родился первый вискозиметр – прибор для определения вязкости жидкостей. Такими приборами пользуются машиностроители для правильного подбора смазочных материалов.

Ломоносов оставил ряд интереснейших исследований часовых механизмов, высказал мысль об использовании в часах хрустала и стекла для уменьшения трения. Ученый выступал не только как теоретик, но и как конструктор. Им были построены токарный и лобовые станки, созданы проекты коленчатых валов, водяных помп, лесопильных мельниц.

Заслуга М. В. Ломоносова перед механикой состоит и в том, что под его руководством работали мастерские Академии наук,

ставшие одним из центров русской технической мысли. После смерти М. В. Ломоносова они пришли в упадок и только после того, как в 1769 г. во главе мастерских становится Иван Петрович Кулибин, стали занимать то место, которое занимали при Ломоносове.

Многочисленные изобретения Кулибина свидетельствуют о том, что он был инженером в современном смысле слова. Об этом говорят факты. Он строил свои творческие замыслы на прочной основе строгих расчетов и тщательных исследований. В частности, задумав мост через Неву, Кулибин воплотил его в точные и подробные чертежи. К 1776 г. изобретатель закончил проект, донныне удивляющий нас замечательной глубиной инженерного решения, красотой и изяществом конструкций. Интересен метод, при помощи которого Кулибин провел предварительную проверку возможностей сооружения. Натянув веревку и подвешивая к ней в определенных местах грузики, изобретатель воспроизвел как бы подобие своего моста и сил, действующих на мост. Построил Кулибин и специальную испытательную машину, с помощью которой он проверял свои расчеты.

Создав подобие моста и определив нагрузки, которые способна выдержать модель, Кулибин мог совершенно точно установить и наибольшую нагрузку, которую сможет вынести его мост-гигант. Таким образом, знаменитый российский механик внес важное решение: как в модели воспроизвести точное механическое, а не только геометрическое, внешнее подобие крупного сооружения.

Следует заметить, что Эйлер тщательно проверил расчеты Кулибина и, убедившись в их абсолютной правильности, дал о них восторженный отзыв. Эйлер облек теоретическое открытие Кулибина в математическую форму. Метод подобия вошел в технику как одно из мощнейших ее средств. В практике ни одно ответственное сооружение не строится, прежде чем его маленькое подобие – модель – не пройдет всесторонних испытаний.

Неустанно работала отечественная мысль над развитием теории механики. Так, продолжая дело Ломоносова и Эйлера, академик С. Котельников в 1774 г. выпустил книгу, содержащую учение о равновесии и движении тел. Особенно активизировались поиски

решения технических проблем после открытия в 1755 г. Московского университета. В начале XIX в. академик С. Е. Гурьев опубликовал несколько работ по теории машин и механизмов, в том числе «Основы механики» и «Главные основания динамики». С особенно пристальным вниманием ученый разбирал «общее правило равновесия с приложением оного к “махинам”» [11, с. 37].

Вопросы механики занимают большое место в «Начальных основаниях общей физики», выпущенных в 1801 г. профессором Московского университета П. И. Страховым.

Трудно перечислить все имена выдающихся деятелей российской науки и техники. Имена многих из них стали гордостью всего передового человечества. Одним из таких людей был гениальный математик и механик Михаил Васильевич Остроградский (1801–1862), который был учеником известного математика Огюстена Коши (преподавал в Политехнической школе и Сорбонне). Принцип Остроградского – Гамильтона – жемчужина теоретической механики. Все механические системы подчиняются этому принципу. Руководствуясь им, можно в математических уравнениях отобразить механические процессы. Уравнения, основанные на принципе Остроградского – Гамильтона, подсказывают инженерам пути наилучшего разрешения стоящих перед ними задач.

Остроградский занимался теорией волн, теорией теплоты, изучал упругие колебания тел, вопросы равновесия и движения твердых тел, вековые неравенства в движении планет. Большое внимание он уделял педагогической работе. Кстати, прикладная механика была высоко поставлена в петербургских высших школах. В определенной мере это было заслугой А. Бетанкура (1758–1824), который приехал в Россию в 1808 г. Он принимал участие в организации службы путей сообщения, построил ряд заводов и зданий (в частности, по его проектам был построен Манеж в Москве и заложен фундамент Исаакиевского собора), руководил застройкой Петербурга, в Нижнем Новгороде построил ансамбль ярмарочных зданий, с 1818 г. был генеральным директором путей сообщения. А. Бетанкур являлся одним из учредителей и руководителей первого в России высшего учебного заведения нового типа – Петербург-

ского института путей сообщения, открытого в 1809 г. Именно он привлек к преподаванию несколько выдающихся механиков, выпускников Политехнической школы, воспитал в Институте путей сообщения русских ученых-прикладников. Из профессоров этого института важный вклад в механику внесли Габриэль Ламе (1795–1870) и Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (1799–1864).

В связи с задачами строительства железных дорог в 30-х гг. XIX в. активизируется работа над созданием строительной механики и теории сооружений. Важную работу в этом направлении выполнили воспитанники института путей сообщения. Станислав Кербедз (1810–1893), профессор прикладной механики, спроектировал и построил первый в России металлический мост через Неву. Мост имел семь прочных чугунных пролетов по 32–48 м длиной каждый, восьмой пролет был разводным. Его строительство было окончено в 1850 г. При расчете моста впервые был применен кинематический метод. Герман Егорович Паукер (1822–1889) исследовал устойчивость сводов и пришел к соответствующим теоретическим выводам. При этом пользовался статистическими и кинематическими методами и получил идентичные результаты.

Многим обогатил механику замечательный мостостроитель Дмитрий Иванович Журавский (1821–1891). Достаточно сказать, что именно он спроектировал и построил большинство мостов железной дороги между Петербургом и Москвой, прокладка которой началась в 1843 г. Следует заметить, что опыт предшественников – создателей мостов обычного назначения – мало годился для проектирования железнодорожных мостов, которые должны были выносить значительно большие динамические нагрузки. Известные в ту пору мосты, составленные из форм системы инженера Ф. Х. Гау, не обладали надежной прочностью. Ф. Х. Гау строил мостовые фермы, элементы которых были совершенно одинаковы по всей длине, как близ опор, так и в средней части. Журавский подверг тщательному исследованию ферму Ф. Х. Гау. Построив ее модель, русский инженер заменил в ней болтовые соединения проволоками. Нагрузив модель и заставляя скрепляющие ферму проволоки колебаться, как струны, он обнаружил, что они в разных частях

фермы издают звуки разных типов. Предвидения Журавского оправдались: нагрузка в разных частях фермы оказалась неодинаковой. Так изыскным опытом Журавский установил серьезный недостаток мостов конструкции инженера Ф. Х. Гау. Исследование его ошибки послужило Журавскому отправной точкой для создания научно обоснованных методов мостостроения. Применяв свой метод раскосных ферм, Журавский в 1855 г. построил Веребьинский мост длиной более чем в полкилометра. Имя русского инженера получило известность во всем мире. Ни одной катастрофы не случилось с мостами, построенными Журавским, хотя часть их приходилось строить из дерева. Способность Журавского к научному осмысливанию задач строительной практики ярко проявилась и тогда, когда ему пришлось заняться проектированием и постройкой металлического шпиля для собора Петропавловской крепости. Опыты над моделями и методические расчеты, которые Журавский производил во время конструирования шпиля, позволили открыть очень важные для техники методы расчета двутавровых балок.

Такие балки – необходимый элемент мостов, перекрытий зданий, железных каркасов заводских цехов, словом, всякого крупного сооружения. Тогда же Журавским была разработана общая теория проектирования сквозных пирамидальных сооружений, заложены основы теории сопротивления материалов и конструкций.

Последователь Журавского Николай Аполлонович Белелюбский (1845–1922) вошел в историю техники как создатель большого числа замечательных мостов, пришедших на смену деревянным. Более пятидесяти сооружений спроектировал Белелюбский. Так, Сызранский мост через Волгу, построенный им в 1875–1881 гг., долгое время не имел равных в Европе по величине и оригинальности конструкций (13 пролетов по 111 м каждый). Огромен и мост через Днепр из 15 пролетов по 71,3 м, созданный им в 1881 г. Белелюбский был инициатором широкого применения в железнодорожном строительстве научных методов испытания материалов, для чего он создал специальную лабораторию, равной которой не было за границей.

Богатейшее наследство оставил в механике Пафнутий Львович Чебышев. Великий теоретик, прославивший себя блестящими открытиями в математике, с увлечением решал насущные задачи промышленной практики, как математик нередко предлагал оригинальные решения инженерных задач. Интересен факт решения им проблемы выпрямляющего механизма (или параллелограмма Уатта). Выпрямляющий механизм Уатта, названный по имени изобретателя, был предназначен для превращения кругового движения в прямолинейное и выполнял свою задачу не совсем удовлетворительно. Движение только в грубом приближении можно было считать прямолинейным. А из-за такого несовершенства параллелограмма Уатта в машинах возникали вредные сопротивления. Чебышев разрабатывает метод теоретического расчета выпрямляющих механизмов, т. е. механизмов, способных «выпрямлять» вращательное движение, превращать его в прямолинейное. Подобные механизмы стали основой многих совершенных конструкций. Следует заметить, что работа над выпрямляющим механизмом была для Чебышева отправной точкой в его деятельности по созданию теории механизмов и машин. Проявляя незаурядные инженерные способности, Чебышев создает и разнообразнейшие механизмы, способные точно воспроизводить движения, работать с остановками, превращать непрерывное движение в движение прерывное. Он строит свою знаменитую переступающую машину, точно воспроизводящую движение идущего животного, создает гребной механизм, повторяющий движение весел, самокатное кресло, модель новой сортировальной машины.

Чебышев изобрел и автомат для вычислений. Созданный в 1881 г., он явился как бы продолжением его работы над совершенствованием оригинальной суммирующей машины, которую Чебышев изобрел тремя годами раньше. Здесь уместно указать, что арифмометр построен в 1874 г. петербургским изобретателем В. Т. Однером. Это прототип арифмометров, которыми пользовались длительное время в XX в., а кое-где и до недавнего времени. В отличие от других счетная машина Чебышева могла работать в быстром темпе, превышающем 500 вычислений в час. Поэтому принцип, положенный

Чебышевым в конструкцию счетного автомата, привлекал и привлекает к себе внимание многих инженеров. К сожалению, данная модель распространения в России не получила и очутилась в Париже, в музее искусств и ремесел.

Инженеры и ученые черпают в трудах Чебышева методы, формулы, идеи. Когда нужно узнать, при каких условиях проектируемая система рычагов, шарниров, колес может стать цельным механизмом, обращаются к знаменитой структурной формуле Чебышева. Это одна из необходимейших формул для инженеров. Важным достижением русского ученого было и доказательство знаменитой теоремы трехшарнирных четырехзвенников. Являясь основателем и руководителем петербургской математической школы, он впервые вводит в теорию механизмов (т. е. в прикладную кинематику) математические методы (работа «Теория механизмов», известных под названием параллелограммов).

По совету Чебышева кинематикой механизмов занимались Джеймс Джозеф Сильвестр и ряд английских ученых, которые работали над вопросом о воспроизведении математических зависимостей при помощи механических средств.

Идеи Чебышева получили развитие в работах его учеников. Перу ученика Чебышева – Александра Михайловича Ляпунова, гениального математика и механика, принадлежит изложение теории устойчивости движения. Всякая система, механическая или электрическая, во время работы испытывает ряд внешних и внутренних воздействий. Зачастую эти воздействия нарушают согласованность работы отдельных частей системы. Она при этом теряет устойчивость движения, «разлаживается». Возникают вредные вибрации, толчки, усилия.

Теория Ляпунова, рассматривающая условия устойчивости движения, стала основой научного проектирования самых разнообразных машин и устройств. Вся ценность этой теории выявилась лишь позже, в дни техники больших скоростей, реактивной авиации, автоматики, телемеханики, радиотехники. Конструкторы сложнейших механических и электрических устройств проверяют методом, созданным Ляпуновым, будет ли устойчива, надежна в работе созданная ими система.

Новую теорию пространственных зубчатых механизмов создал другой ученик Чебышева – Х. И. Гохман. Над теорией структуры плоских и пространственных механизмов успешно работал П. И. Сомов.

Во второй половине XIX в., когда в промышленности все шире и шире стали распространяться первые двигатели, перед инженерами встал вопрос о создании надежно работающих регуляторов, способных точно и безотказно реагировать на малейшие изменения нагрузки на паровую машину. К плеяде выдающихся ученых-механиков принадлежит Иван Алексеевич Вышнеградский (1831–1895). Именно он положил начало теории автоматического регулирования. Этот труд явился ответом русского ученого на настоятельные требования инженерной практики. Дело в том, что от качества точности изготовления регулятора, его расчета и исполнения зависела работа машины. Неоднократные попытки создать методы предварительного расчета регулятора не давали результатов. И. А. Вышнеградскому удалось решить эту важнейшую научную и техническую задачу. Вышнеградский, в отличие от своих многочисленных предшественников, рассматривал движение регулятора не изолированно, а во взаимодействии с движением самой машины. Он вывел ряд математических уравнений и, блестяще их проанализировав, создал знаменитые «неравенства Вышнеградского».

Выводы русского ученого имели первостепенное значение для практики. «Неравенства» и «диаграммы Вышнеградского» стали основой расчета чувствительных, безотказно работавших в свое время регуляторов. Работа И. А. Вышнеградского «О регуляторах прямого действия» была сразу же переведена на несколько иностранных языков. С развитием техники значение ее раскрывалось все шире и шире. Все позднейшие изыскания в области автоматического регулирования опирались на эту работу. И сегодня теория, созданная Вышнеградским, помогает инженерам создавать различные автоматические устройства.

Крупные успехи были достигнуты российскими исследователями и в изучении трения в машинах. Борьба с трением, правильно разработанный режим смазки имеют огромное значение в технике.

В конце XIX в., когда промышленность развивалась особенно бурно, от правильного решения этих проблем зависел дальнейший прогресс техники, успех борьбы за высокие скорости и большие мощности. Русский ученый Николай Павлович Петров (1836–1920), впоследствии почетный академик, опубликовал в 1883 г. в «Инженерном журнале» работу о трении в машинах. Он осветил одно из самых «темных» мест механики. Большое внимание ученый уделил проблеме смазывания трущихся поверхностей.

Н. П. Петров доказал, что правильно смазанные твердые поверхности не приходят в соприкосновение: их разделяет жидкая пленка. «Если же, – писал он, – жидкий слой, смазывающий два твердых тела – вполне отделяет их одно от другого, то непосредственного трения твердых тел уже, очевидно, не может быть. Таким образом, трение в смазанном подшипнике имеет иную природу, нежели трение “сухое”; оно складывается из трения между твердым телом и жидкостью, и трением, возникающим при вращении в слоях самой жидкости» [11, с. 49].

Труд Петрова «Трение в машинах» положил начало классической гидродинамической теории трения. Развитию и углублению этой теории ученый посвятил множество работ, вошедших в золотой фонд современной механики. Формула Петрова, позволяющая определить силу трения в зависимости от качеств смазочной жидкости, скорость движения и давления на единицу трущейся поверхности, – одна из важнейших инженерных формул, которой пользуются механики.

Создание аэродинамики в значительной степени связано с именем Николая Егоровича Жуковского (1847–1921). Его деятельность не исчерпывается кругом определенных вопросов механики. Имея огромные заслуги в создании авиационной науки, он вел исследования турбин, ткацких машин, велосипедных колес, речных судов, мукомолен и т. д. Он составил уравнения динамики для центра тяжести птицы и определил ее траекторию при различных условиях движения воздуха. Особенно плодотворны для Жуковского были 1894–1898 гг., когда он интенсивно работал над изучением полета тел тяжелее воздуха. Крупной научной работой Жуковского

является доказательство теоремы о так называемом жестком рычаге. Значение этого труда неизмеримо велико. Почти в каждом механическом устройстве мы найдем либо рычаги, либо их разновидности: ворот, шкивы, шестерни. Этот метод только часть, только звено этой стройной теории механики, в которой Жуковский слил воедино кинематику, кинемостатику и динамику механизмов.

Существенный вклад в науку в XIX в. внесла первая русская женщина-математик Софья Васильевна Ковалевская (1850–1891). Став профессором Стокгольмского университета (1884), она блестяще прочла 12 различных курсов, в том числе курс механики. В области механики особенно велик ее вклад в теорию гироскопов: в 1888 г. она опубликовала «Задачу о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки», в которой указала на новый случай гироскопа. Впервые после Эйлера и Лагранжа было сказано новое слово в теории волны. Своим вкладом в эту область механики С. В. Ковалевская продвинула теорию далеко вперед, оставив блестящие исследования вращения твердого тела вокруг неподвижной точки.

Говоря о развитии инженерных наук, нельзя не сказать о заслугах отечественных ученых в создании теоретических основ одного из важнейших производственных процессов – процесса резания. Резание – это точение на токарных станках, это фрезерование, сверление, строжка, протягивание, шлифовка – все то, что принято называть «холодной обработкой металлов». Следует сказать, что резание – один из старейших способов придать изделию нужную форму. Многими тысячелетиями отделен от нас тот момент, когда впервые острие инструмента, зажатого в руке человека, сняло стружку с дерева или кости. Но до середины XIX в., когда на заводах всего мира работали уже десятки тысяч металлорежущих станков, сущность процесса резания оставалась неизвестной.

Производственники не имели правильного представления о том, что происходит с металлом в момент, когда лезвие резца вживается в него и отделяет от него слой стружки. Токари подбирали режимы резания, углы заточки инструмента, основываясь только на опыте.

По-научному подошел к проблеме резания ученый Иван Тиме, опубликовавший в 1870 г. труд «Сопротивление металлов и дерева резанию» – плод многолетних исследований. И. Тиме установил новые законы резания. Проведя огромное количество опытов, он показал, что в момент снятия стружки под действием резца в металле происходит постепенное непрерывное разрушение частиц, а стружка отделяется в результате скалывания частиц. Русский ученый дал научно обоснованные таблицы резания и формулы, которые перешли затем во все руководства по металлообработке.

В 1893 г. с теорией резания выступил профессор К. А. Зворыкин. Исходя из исследований, в которых применяется изобретенный им прибор для измерения сил резания, Зворыкин предложил формулу, позволяющую установить зависимость толщины снимаемой стружки от силы, действующей на инструмент.

Три года спустя, в 1896 г., другой российский ученый, А. А. Брикс, выпустил книгу «Резание металлов», где дал научную разработку режимов резания, показал, какие углы резания, какие режимы следует применять при обработке металла той или иной твердости.

Большое значение для продвижения вперед науки о резании металлов имели работы Я. Г. Усачева, талантливого техника мастеровских Петербургского политехнического института. Усачев провел большие исследования микроструктуры металлической стружки: стал фотографировать микрошлифы, полученные из металла стружек. Это позволило ему в подробностях изучить процессы, происходящие в стружке в момент отделения ее от обрабатываемого изделия. Усачев положил начало исследованию одного из важнейших явлений, сопровождающих резание, – выделение тепла. Вклад ученых-практиков в создание режущего инструмента в металлообработке весьма значителен. Так, изобретатель А. М. Игнатьев создал самозатачивающиеся инструменты. Резцы, ножи, пилы, зубья ковшей экскаваторов, сделанные по методу Игнатьева, не только не тупятся во время работы, но даже становятся острее. К изобретению этих замечательных инструментов А. М. Игнатьев, биолог по образованию, пришел оригинальным путем. Он начал с разгадки удивительного факта: почему зубы грызунов и когти хищников

всегда остры, никогда не тупятся. Он разгадал, что самая твердая часть когтя или зуба – его сердцевина. Поэтому чем дальше слой находится от сердцевины, тем он быстрее стирается во время работы. Серцевина вследствие этого возвышается над окружающими слоями, поэтому зуб или коготь всегда имеют заостренную форму. Угол резания такого природного инструмента неизменен. Разгадав секрет неизменной остроты зубов и когтей, Игнатъев положил этот принцип в основу своих самозатачивающихся инструментов. Он собрал их из отдельных листков стали, изобретя для этого и особый способ сварки по всей поверхности предмета. Листки были изготовлены из сталей самых разных твердостей: начиная от самых мягких и кончая самыми твердыми, из которых делались сердцевинные слои.

Большую работу провел А. М. Игнатъев по внедрению трубчатого вращающегося резца. При неподвижном резце половина, а порой и больше всей энергии, потребляемой для резания металла, непроизводительно тратится на преодоление трения между стружкой и резцом. Остроумным путем он сумел избежать этих потерь. Резец Игнатъева, похожий на чашку с заточенной кромкой, укрепляется в подшипнике. Стружка металла, ползущая с изделия, приводит резец во вращение. Резцы, над которыми работал Игнатъев, позволяют добиваться огромных скоростей резания, достижимых только с резцами из специальных твердых сплавов. Вообще следует сказать, что своими методами скоростного резания прославились многие ученые и новаторы производства. Рядом с именем известного физика В. Д. Кузнецова и его учеников, разработавших теорию скоростного резания, стоят имена мастеров усовершенствованной обработки металлов: Г. Борткевича, П. Быкова, Ю. Дикова, А. Чикарева, В. Колесова и др. Токарь П. Рыжков сделал замечательный вклад в технику – он сконструировал устройство, гасящее вибрации.

Огромное значение как для теории механики, так и для практики инженерного дела имели работы по научной классификации механизмов. Нужда в такой классификации машин относится к XVIII в.: французский ученый Монж еще тогда попробовал

навести порядок в мире механизмов. Однако классификация Монжа получилась столь громоздкой, что ученый, доведя составление ее до 21 класса, прекратил свою работу. Позднее за разработку классификации механизмов брались многие ученые – Гашет, Бетанкур, Виллис. Но эти системы оказались недостаточно жизненными. Задача создания действительно научной системы механизмов долгое время оставалась нерешенной. Первым, кто занялся последовательным построением классификации механизмов, был ученик Жуковского – русский ученый-механик Леонид Владимирович Ассур (1878–1920). Он пришел к выводу, что любой, даже самый сложный механизм можно рассматривать как сочетание нескольких более простых элементов. Образование механизмов, по Ассуру, можно представить как своеобразное наложение таких элементов. Анализ этих-то составных частей механизма и положил ученый в основу своей классификации.

Разработка структурной теории Ассура была продолжена советским ученым Иваном Ивановичем Артоболевским (1905–1977). Работая на протяжении ряда лет над развитием идей своего предшественника и исследуя важный вопрос о возможности их применения, он построил стройную структурную и классификационную систему механизмов.

Тончайший вопрос теоретической механики нашел свое разрешение в трудах русского ученого Ивана Всеволодовича Мещерского (1859–1935) – автора классического учебника и задачника по теоретической механике, которые не утратили практического значения и сегодня. Выдающийся теоретик Мещерский основал новый раздел науки – механику тела с переменной массой. Это, как казалось когда-то, далекое от практики исследование с развитием техники приобрело исключительное значение. К телам с переменной массой, главные законы движения которых установил Мещерский, принадлежит и ракета: во время полета масса ее по мере сгорания топлива резко меняется. И сейчас, когда в авиации созданы аппараты с реактивными двигателями, труды русского исследователя привлекают пристальное внимание инженеров и ученых, используются при расчете космических аппаратов.

Многим обогатил механику и «создатель кораблестроительной науки» Алексей Николаевич Крылов (1863–1945). Разрабатывая метод подобия, основы которого заложил еще Кулибин, он дал теорию моделирования кораблей. Крылов оставил глубокие исследования в труднейшей отрасли механики, изучающей гироскопы. Его труды по теории гироскопа стали настольными книгами конструкторов навигационных приборов. Теория Крылова помогает строить морские и авиационные гироскопы и автопилоты.

Новое слово в машиностроении сказал академик Василий Прохорович Горячкин (1868–1935). С его именем связано рождение новой науки – науки о сельскохозяйственных машинах. Возраст плуга исчисляется многими тысячами лет, но и в конце XIX в. это важнейшее сельскохозяйственное орудие конструировали, основываясь только на одном опыте, не вводя теоретических расчетов. Так же обстояло дело и с машинами, появившимися позднее, – жатками, сеялками, молотилками. Науки о сельскохозяйственных машинах не существовало. Тем более не делалось попыток установить зависимость конструкции земледельческих машин от свойств зерна, почвы и особенностей растений.

Не отбрасывая пока старого, чисто описательного курса машиностроения, Горячкин с 1896 г. читает курс сельскохозяйственных машин в Петровской сельскохозяйственной академии (ныне им. Тимирязева) и активно работает над теоретическими основами и конструированием сельскохозяйственных машин. Горячкин создает теорию для сельскохозяйственного машиностроения – теорию построения плуга. В 1900 г. он печатает научные работы «Бороны», «Веялки», «Сортировки», «Жатвенные машины». Раскрывая законы механики, на которых основано действие машин, он впервые пытается теоретически решить, каким требованиям должно отвечать устройство земледельческой машины. Этими трудами и ознаменовалось рождение новой науки – науки о сельскохозяйственных машинах, названной Горячкиным «земледельческая машина»; он и заложил также основы общей теории рабочих машин.

Первые годы XX в. характеризовались повышенной активностью машиностроителей. Появление новых типов машин, в особенности

транспортных, заставило обратить серьезное внимание на материалы, применяемые в машиностроении, и на совершенствование расчетных методов теории упругости. Степан Прокофьевич Тимошенко (1878–1971), бывший первые годы XX в. профессором Петербургского института инженеров путей сообщения, решил ряд задач изгиба и кручения призматических стержней. Важное значение в теории упругости получили в это время двухмерная и трехмерная задачи. Для решения двухмерной задачи Г. В. Колосов (1877–1936) воспользовался аппаратом теории функций комплексного переменного. Эти идеи были развиты его учеником Н. И. Muskhelishvili (1891–1976), который изучил концентрацию напряжений и впервые учел связь термических и силовых напряжений. Решение трехмерной – пространственной задачи было дано С. П. Тимошенко, А. Фепплем, К. Рунге. Несколько позже, в конце 1920-х гг., Muskhelishvili предложил и в этом случае использовать методы теории функций комплексного переменного. Как уже отмечалось, к началу XX в. относится становление неголономной механики. Как известно, этим термином Герц предложил называть системы, движение которых подчинено неинтегрированным кинетическим связям, и впервые использовал его в своих «Основаниях механики» (1894). В 1895 г. С. А. Чаплыгин составил дифференциальные уравнения движения системы в обобщенных голономных координатах при наличии линейных неголономных связей и равного числа циклических координат. Важный вклад в теорию внес профессор Киевского университета Петр Васильевич Воронец (1871–1923). Впервые он занялся неголономной механикой в 1901 г. Позже вывел общие уравнения движения неголономных систем. В 1909 г. в работе «Задача о движении твердого тела» и в последующих работах П. В. Воронец ввел условие зависимости силы лишь от положения точки от поверхности.

В тесной связи с неголономной механикой находится динамика живых организмов, основополагающие работы которой опубликовал в первом десятилетии XX в. профессор Екатеринославского (Днепропетровского) горного института Ярослав Иванович Грдина (1871–1931).

На стыке многих направлений – механики, математики, различных отраслей техники – возникла в конце XIX в. теория устойчивости. Здесь, наряду с Анри Пуанкаре, громадная заслуга принадлежит Александру Михайловичу Ляпунову. Его основополагающие научные поиски, и особенно докторская диссертация «Общая задача об устойчивости движения» (1892), послужили основой теории.

Период, охватывающий конец XIX и первые десятилетия XX в., оказался чрезвычайно плодотворным в истории развития теоретической и прикладной механики. В эти годы были высказаны многие идеи, развитые впоследствии в целые научные направления.

Характерным является повышенный интерес к сравнительно небольшому числу проблем (в 20-е гг. XX в.): аэродинамика, гидродинамика, теории рабочих машин, неголономная механика. Одновременно весьма активно велись чисто математические исследования, возникали новые направления.

Очень важную роль в развитии отечественного математического естествознания сыграла московская математическая школа, основанная А. Д. Егоровым и его учеником Н. Н. Лузиным. К этой школе принадлежат такие крупные ученые, как П. С. Александров, М. А. Лаврентьев, А. Н. Колмогоров, И. И. Привалов, Д. Е. Меншов, Н. К. Бари, М. В. Келдыш, В. В. Голубев и др. Н. Н. Лузин и его ученики развили ряд важнейших направлений математики и создали математический аппарат для решения многих задач теоретической и прикладной механики.

Большое внимание обращается на практические направления науки. В это время наука начала приобретать новые организационные формы: и в системе Академии наук, и вне ее организуются научно-исследовательские институты. В 1919 г. на Украине была создана Академия наук, вторая в бывшем СССР, в составе которой был открыт Институт технической механики.

В первой половине 1920-х гг. научно-исследовательские институты математики и механики были открыты в составе Ленинградского, Московского и Казанского университетов. Создание сети научно-исследовательских учреждений благоприятно повлияло на развитие исследований в области механики. Уже в 20-х гг., кроме

традиционных школ в Ленинграде и Москве, возникают исследовательские коллективы в Киеве, Харькове, Днепропетровске, Тбилиси.

Следует указать, что в это время развивалась кинематика механизмов в направлении решения задач теории пространственных механизмов, значение которых возросло в связи со становлением авиационного и сельскохозяйственного машиностроения. Бурное развитие машиностроения в довоенные пятилетки заставило обратить внимание на создание его теоретических основ. Сложность задач кинематики пространственных механизмов вызвала поиски общей методики решения. Первыми обратились к изучению пространственных механизмов Н. И. Мерцалов, И. И. Артоболевский, Н. Г. Бруевич и В. В. Добровольский. В начале 1930-х гг. начал развиваться идеи Л. В. Ассура.

С появлением и развитием автомобильного, а затем авиационного транспорта повысился интерес к нефти и ее транспортировке. Возникла практическая задача движения вязкой жидкости. В бывшем СССР над ее решением работал один из учеников Жуковского – Л. С. Лейбензон, принимавший участие в организации Бакинского университета.

В 1920–1930-е гг. самыми важными задачами в области аэрогидродинамики продолжали оставаться те, что были связаны с теорией самолета. В эти годы Н. Е. Кочин решал задачу об установившемся движении круглого в плане крыла в идеальной несжимаемой жидкости, В. В. Голубев развил теорию машущего крыла, А. Н. Доросницын решил задачу полета для случая стреловидного крыла и крыла, летящего со скольжением. Идеи Н. В. Жуковского получили дальнейшее развитие в работах А. И. Некрасова, М. А. Лаврентьева, М. В. Келдыша, Л. И. Сизова.

Огромные преобразования, происшедшие в народном хозяйстве СССР в 1930-х гг., не могли не отразиться и на развитии не только механики, но и других инженерных наук. Проблемы, которые имели ранее только теоретическое значение, получили важное практическое применение. К ним относилась, в частности, проблема устойчивости. Она имеет важное значение для самых

различных областей науки и техники, имевших дело с системами, состояниями и процессами. А. Н. Ляпунов в монографии «Общая задача об устойчивости движения» (1892) решил эту проблему для систем с конечным числом степеней свободы. Н. Г. Четаев (1902–1959) применял теорию Ляпунова к проблеме неустойчивости движения и решил ряд технических задач, которые относились к устойчивости полета снаряда и устойчивости самолета. В 1936 г. он предложил постулат устойчивости, содержащий требование малых отклонений между теорией и экспериментом. Методы Ляпунова нашли применение также в учении о колебаниях. Повышение рабочих скоростей заставило обратиться к нелинейной теории колебаний. К началу 1930-х гг. в СССР ею занимались две школы: Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и А. А. Андропова, которые исходили из нелинейной теории разноколебаний, применяя при этом методы Ляпунова, и киевские школы И. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова, которые развивали асимптотические методы. Исследования Крылова и Боголюбова привели к созданию нового научного направления, получившего название нелинейной механики. Методы нелинейной механики тогда же были применены к решению важнейших задач строительной механики, авиастроения, машиностроения, электротехники и радиотехники.

В это же время одно из первых мест по важности технических решений заняли вопросы механики сплошной среды.

В области теории упругости Н. И. Мусхелишвили и его ученики исследовали плоскую задачу при помощи методов теории функций комплексного переменного. В середине 1930-х гг. Б. Г. Галеркин (1871–1945) построил теорию изгиба пластинок и начал исследования по теории оболочек, которые привели к значительным результатам: он обеспечил большую точность расчетов и распространил теорию на оболочки средней толщины. Предложенное им приближенное решение для цилиндрической оболочки дало возможность рассчитывать трубопроводы под произвольной нагрузкой.

Подобные задачи были необходимы для строительной техники. В это же время возникают и комплексные проблемы, относящиеся одновременно к строительной механике, теории упругости

и теории устойчивости, например, проблема устойчивости упругих систем, теория стержневых систем. А. Н. Крылов активно занимался строительной механикой корабля. Его работа «О расчете балок, лежащих на упругом основании» (1930) явилась важным вкладом в строительную механику. В это же время В. М. Майзель начал исследования в области термоупругости, которые продолжил А. Д. Коваленко.

Важным методом исследования напряжений в машинных деталях стал оптический метод, который разрабатывали как советские, так и зарубежные (английские, американские) ученые. Еще в XIX в. начинается оформляться новое направление механики – теория пластичности. Математическая теория пластичности была построена в 1870–1871 гг. Сен-Венаном и Морисом Леви. С середины 1930-х гг. инициатива в дальнейшем решении ее задач переходит к советским ученым. Ряд задач решил С. А. Христианович, затем С. Л. Соболев, который рассмотрел, в частности, состояние, переходное от упругого к пластичному. Математической теорией пластичности занимался и Л. С. Ленбензон.

Во второй половине 1930-х гг. развиваются исследования по созданию машин автоматического действия. В США, Германии, Советском Союзе начинается интенсивная работа над теорией автоматов. Важную роль в этом отношении сыграли труды И. И. и С. И. Артоболевских. В Ленинградском политехническом институте С. В. Вехирев и Н. И. Колчин организовали первую в Советском Союзе кафедру теории машин автоматического действия. Одним из первых советских ученых, которые работали в этом направлении, был А. П. Павлов. В 1937 г. он опубликовал работу «Методика построения механизмов-автоматов» и в дальнейшем неоднократно обращался к этой теме.

Следует заметить, что в эти годы началась разработка механики материалов и теории их прочности. Большие объемы строительных работ, новые отрасли машиностроения (авто- и авиастроение и др.) требовали металла более высокого качества. Кроме того, новые требования на строительные и машиностроительные материалы определили поиски новых материалов с заданными свойствами.

Возникают и новые методы обработки металлов. Важнейшим из них стала электросварка. Основоположником сварки в Советском Союзе был выдающийся машиностроитель Е. А. Патон (1870–1953). Интересно, что происхождение сварки связано с одной из важнейших отраслей технологии строительных работ – скреплением элементов металлических конструкций. В 1929 г. Патон организовал при кафедре инженерных сооружений Всеукраинской академии наук электросварочную лабораторию со штатом шесть человек. Одной из первых задач, поставленных и решенных лабораторией, было определение надежности и прочности сварных соединений железных конструкций.

В 1934 г. на базе лаборатории был открыт институт электросварки АН УССР. На протяжении 1930-х гг. разработана технология электросварки и решены многие задачи прочности сварных соединений. В 1939–1940 гг. Патон завершил создание нового метода скоростной автоматической сварки под флюсом, который получил широкое распространение в годы Великой Отечественной войны.

Метод соединения элементов металлоконструкций при помощи сварки был лишь одним из практических выходов прикладной механики. 1920–1930-е гг. принесли много проблем, связанных с созданием новых конструкций. В строительную практику начал внедряться железобетон, появились рамные конструкции, элементы которых работают в основном на изгиб. Для расчета таких конструкций были созданы новые методы, основанные на учении деформации. Если для XIX в. характерной конструкцией мостов были фермы, то в 1930-х гг. вновь появились арки, а это поставило перед строительной механикой новые задачи.

В середине 1950-х гг. начинается период современной научно-технической революции. Изменяются интересы исследователей, работающих в разных направлениях механики. Интересы эти в значительной мере обусловлены практическими задачами, поэтому в аналитической механике большой интерес стали проявлять к динамике переменной массы, неголономной механике, теории гироскопов. Большое распространение получает нелинейная механика,

заявлявшая важное место в исследованиях колебательных процессов; идеи теории колебания пересеклись едва ли не во всех направлениях прикладной механики. Все большее значение получают исследования, находящиеся на стыке различных направлений механики, а также на стыке механики и математики, геологии, метеорологии, биологии.

Одной из характерных особенностей научно-технической революции является то, что наука становится непосредственной производительной силой: она вызывает к жизни технические решения, определяет появление новых отраслей техники, новых видов производства. В ее развитии теперь преобладает интегральный путь, когда новое направление возникает на стыке других, зачастую разнородных.

Например, в механике применение метода графостатики к решению задач динамики механизмов определило становление кинетостатики и, наоборот, кинематические графоаналитические методы нашли применение в строительной механике. Применение методов гидродинамики к решению задач теории трения вызвало к жизни гидродинамическую теорию смазки, появились новые направления на стыке теории колебаний со строительной механикой, механикой машин, механикой материалов и т. д. В результате современная механика разделилась на много направлений, которые сливаются, с одной стороны, с математикой, с другой – с различными направлениями техники. Есть общее между различными направлениями механики, свойственное периоду научно-технической революции. Это учет реальных условий работы изучаемых объектов, обусловленный ростом рабочих скоростей и параметров. Новые отрасли производства, возникающие в связи с развитием атомной энергетики, освоением космоса, настройкой машин большей мощности, должны иметь высокую степень надежности, подтвержденную точностью расчетов. Создание электронных вычислительных машин, позволивших механизировать вычислительные работы, также является одним из аспектов современной научно-технической революции.

С середины 1950-х гг. в механике машин начинается быстрое развитие экспериментальных и математических методов исследования и как следствие – переход к изучению машин в реальных условиях их работы. По инициативе И. И. Артоболевского в практическом машиностроении с успехом стали применять метод динамики тел переменной массы.

Математические, строительные, горные, полиграфические, текстильные, сельскохозяйственные и другие машины имеют в своем составе механизмы с переменной массой, частичная потеря массы влияет на динамику всей системы в целом. Все большее значение приобретает синтез механизмов, а задачи синтеза механизмов вплотную связаны с проблемами теории машин автоматического действия и с проблемой создания роботов и манипуляторов. Технические устройства, предназначенные для воспроизведения функций человеческой руки, широко применяются в современных производствах: в атомной энергетике, при космических исследованиях, при исследовании морских глубин, для работы при высоких температурах, в химической промышленности и т. п.

В 1960–1970-х гг. появилось много работ в области механики, обусловленных, в первую очередь, потребностями техники. Но многие исследования определялись также и чисто теоретическими интересами, и пересечение их с техническими проблемами явилось уже вторичным, т. е. наука готовила почву для дальнейшего развития техники. Например, современные самолеты – результат приложения сил едва ли не всех отраслей и направлений механики: строительной, теории упругости и теории прочности, которые должны обеспечить прочность конструкций, нелинейной механики, учитывающей колебательные процессы, теории устойчивости, теории механизмов и многих других, в особенности аэродинамики. В связи с повышением скоростей полета и появления сверхзвуковых самолетов в 1960-е гг. были проведены глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области сверхзвуковых течений газа. Были разработаны расчетные методы для гиперзвуковых скоростей, создана теория сильного взрыва в покоящемся газе и т. д. В результате возникла теоретическая база, облегчившая

создание новых высокоскоростных самолетов. В 1955 г. советская авиационная промышленность начала выпускать новые самолеты типа ТУ-104 с двигателями турбореактивного типа. В 1957 г. на пассажирской линии был выпущен самолет ТУ-114, а в 1968 г. – ТУ-154 с тремя реактивными двигателями, рассчитанными на перевозку 164 человек со скоростью до 1 000 км/ч на расстояние до 6 000 км. Одновременно советская промышленность начала выпускать и турбовинтовые самолеты. В 1965 г. в СССР был построен самый большой в мире транспортный самолет «Антей» с четырьмя турбовинтовыми двигателями по 15 тыс. л. с. каждый, в 1968 г. – первый в мире сверхзвуковой пассажирский самолет ТУ-144.

Несколько позже подобные самолеты были построены в США («Боинг-2707»); английская и французская авиапромышленность выпустила совместно самолет «Конкорд». Эти самолеты имеют крейсерскую скорость 2 500–3 000 км/ч.

Современная НТР вызвала к жизни много новых технических проблем. Интересно, что сейчас под обобщающим названием «строительная механика» понимают уже целый ряд самостоятельных наук и научных направлений. Из строительной механики выделились в отдельные направления строительная механика стержневых систем, висячих систем, пластин и оболочек. При этом, помимо статических методов расчета строительных конструкций, во многих случаях используются кинематические и динамические методы. Значительное развитие получили исследования в области теории устойчивости конструкций.

На стыке наук постоянно появляются новые направления: теория атомов, молекулярная теория, теория спектров излучения, аэродинамика газовых потоков, некоторые направления авиационной техники, электродинамика и другие науки небесных туманностей, небесных тел, космических структур; зарождается новое научное направление – космическая аэродинамика. XX век расширил диапазон исследований. Но, как показывает практика, опыт – не предел, ибо развитие человеческого знания идет по спирали, которая уходит в бесконечность. На этом пути вклад отечественных ученых безмерен, многогранен и актуален.

* * *

Состояние науки первого десятилетия XXI в. характеризуется положительными тенденциями. Постепенно нормализуется деятельность научных учреждений, восстанавливается система публикаций, научных конференций и симпозиумов. Серьезной проблемой пока остается ориентация отечественного бизнеса лишь на быстрое получение прибыли и, соответственно, крайне низкий интерес к инновациям, к финансированию прикладной науки, дающей прибыль лишь в перспективе. В 2000–2011 гг. в России инвестиции частного бизнеса в науку были меньше, чем в других развитых странах, в 8–10 раз. По этой причине проблема восстановления отечественной науки требует еще очень много усилий, необходима также психологическая перестройка наших бизнесменов.

3. МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

3.1. Особенности НИР и ОКР

Рассматривая методы выполнения н а у ч н о - и с с л е д о - в а т е л ь с к о й р а б о т ы (НИР), целесообразно вначале упомянуть некоторые особенности такой работы:

1) конечный результат научного исследования никогда не бывает заранее точно известным, он может быть только предполагаемым, особенно в фундаментальных исследованиях (необходимость новизны);

2) установление достоверности любого научного предположения должно опираться только на факты и допускать проверку полученных результатов без участия автора (необходимость воспроизводимости эксперимента);

3) как бы ни были конкретны решаемые задачи в прикладных исследованиях, решения всегда должны содержать элементы общего характера, т. е. не ограничиваться частным случаем, а всегда охватывать множество возможностей, т. е. быть применимы к другим аналогичным ситуациям.

Рассматривая первую особенность, следует отметить, что неопределенность ожидаемого результата НИР представляет для инвестора крайне негативный фактор, ибо она неизбежно порождает риск неэффективности денежных вложений. В этой связи инвестору перед принятием решения о финансировании той или иной НИР приходится тщательно разбираться, что это за НИР, какие у нее перспективы. Для этого обычно привлекаются опытные эксперты, но, как показывает практика, полной гарантии безошибочности решения это не обеспечивает.

Аналогичные проблемы возникают и перед руководителями научных учреждений в государственном секторе экономики, особенно

когда намечаются длительные дорогостоящие исследования. В целях снижения опасности неэффективного вложения денег в науку перед развертыванием крупных исследований проводятся так называемые поисковые исследования.

Поисковое исследование — это небольшая научная работа, в которой оцениваются целесообразность и способы подробного изучения выдвинутой идеи, потребные ресурсы с учетом реальных возможностей организации-исполнителя. Такие исследования обычно продолжаются не более одного года и включают изучение литературных данных, патентов, выполнение предварительных расчетов, иногда несложные эксперименты. Если получаемые результаты не подтверждают целесообразности подробных исследований, работа на этом прекращается, т. е. тема не открывается. Поисковые работы не обязательно реализуются в форме отдельной темы. Они могут быть начальным этапом НИР, после выполнения которого окончательно решается вопрос о целесообразности дальнейших исследований в данном направлении.

Научное учреждение должно постоянно искать новые пути развития той или иной сферы знания и связанных с ней отраслей производства, поэтому оно должно все время выдвигать поисковые темы. Отсутствие в научном учреждении поисковых тем, как правило, означает тупик в его работе, т. е. отсутствие интересных идей и перспектив.

Неопределенность характерна не только для результатов НИР, но и опытно-конструкторских разработок (ОКР), хотя и проявляется она в несколько иной форме. Так как разработки представляют конечный этап научно-технического процесса, их цели обычно определяются довольно четко и указываются в самом названии каждой разработки (например, «Разработка рекомендаций по проектированию...» или «Разработка технических условий по производству...», «Разработка программного комплекса по проектированию...» и т. д.). Тем не менее желаемый результат далеко не всегда удается получить в намеченный срок при намеченных затратах. Представляемые разработчиком решения при обсуждении вполне могут быть признаны недостаточно продуманными, требующими

доработки, что особенно типично для принципиально новых решений. Доработка неизбежно влечет за собой дополнительные затраты времени и материальных средств. Иногда работа на этом не заканчивается, и доработка требуется снова и снова. При внедрении в производство результатов ОКР также выявляется необходимость внесения дополнительных изменений, снова требующих затрат, что опять-таки типично для принципиально новых решений. Иными словами, технологическая перестройка производства может потребовать значительно большего времени и материальных затрат, чем это первоначально предполагалось. В то же время всякая поспешность и попытки внедрения недоработанных предложений могут опорочить идею разработки, которая сама по себе может быть очень ценной. Это способно повлечь за собой потерю конкурентоспособности выпускаемой продукции, даже если в ней реализуются ценные идеи, до которых не додумались конкуренты. Потребителя интересует только практическая полезность приобретаемой продукции, но отнюдь не ценность заложенных в нее идей.

Рассматривая вторую особенность, необходимо отметить, что любые гипотезы, какими бы тривиальными или «сумасшедшими» они ни казались исследователю, должны проверяться беспристрастно, терпеливо, с ориентацией только на факты. Как говорил академик И. П. Павлов, «факты – это воздух ученого... Без них ваши “теории” – пустые потуги» [20, с. 41]. Сколь категоричны бы ни были утверждения того или иного автора о том, что обнаруженная им закономерность или явление действительно существуют, подтверждением может служить только многократное проявление такой закономерности (или такого явления) в экспериментах любого исследователя, который пожелает сделать соответствующую проверку. Если требуемый «факт» обнаруживается только в экспериментах автора – это верный сигнал, что желаемое выдается за действительное. Именно этому условию совершенно не удовлетворяют ставшие модными в 1990-е гг. различные оккультные науки, сенсационные достижения экстрасенсов, сведения о всевозможных пришельцах и т. д. Ни одна попытка серьезной проверки таких достижений пока не дала убедительного подтверждения их досто-

верности. Выдвигаемый же иногда тезис об «эффекте присутствия скептика», оправдывающий любые неудачи экстрасенсов, наукой признаваться не может. Все должно проверяться независимо от личных мнений конкретных экспериментаторов, сколь авторитетными бы они ни были.

Рассматривая третью особенность, необходимо отметить, что отличие любой научной задачи от практической лежит не в сложности применяемого математического или логического аппарата, не в специфике применяемых приборов и оборудования, а в возможности применения получаемых результатов для других ситуаций, т. е. для решения множества практических задач. Если же какие-либо сложные расчеты или измерения относятся только к конкретному случаю, то их необходимо рассматривать как практическое применение научных результатов, а не выполнение самих исследований.

3.2. Организационные принципы выполнения НИР

До XVIII в. включительно научные исследования проводились обычно «бесплатно», т. е. за счет исполнителя, который, как правило, был материально вполне обеспеченным человеком. Академии наук выплачивали своим членам зарплату («жалованье»), но их исследования административно и экономически академиями не регламентировались, тематические планы НИР не составлялись. В дальнейшем, по мере увеличения практической значимости исследований, роста их стоимости, происходило формирование двух партнерских сторон – заказчика НИР и исполнителя НИР.

В настоящее время во всем мире научная деятельность планируется и финансируется как любая другая хозяйственная деятельность. Порядок выполнения НИР стандартизован и тесно увязан с вопросами внедрения научной продукции. Государства СНГ приняли у себя единый стандарт, само название которого указывает на такую увязку: это ГОСТ 15.101–98 «Система разработки и поста-

новки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ». Согласно этому стандарту заказчиком НИР может быть как государственный орган, так и любой другой субъект хозяйственной деятельности (ОАО, ЗАО, ООО, физическое лицо и т. д.). При этом инициатором НИР может быть как сам заказчик, так и организация-исполнитель научной работы (инициативные НИР). Последний вариант наиболее характерен для государственных научных учреждений или вузов. Годовой тематический план «бюджетных» НИР (точнее, проект такого плана) предлагает исполнитель, а государственный орган его проверяет, утверждает и финансирует. Естественно, что государственный орган может и сам предложить НИИ какую-либо конкретную тему, но это происходит относительно редко.

Основанием для выполнения НИР служит **т е х н и ч е с к о е з а д а н и е** (ТЗ), которое чаще всего составляется совместно заказчиком и исполнителем, но утверждается только заказчиком. При наличии частного заказчика составляется **к о н т р а к т** (договор) на проведение НИР, к которому прикладывается упомянутое техническое задание. При согласии частного заказчика техническое задание может не составляться, и все требования к НИР могут излагаться непосредственно в контракте (договоре). При государственном заказчике (в случаях инициативных НИР) техническое задание утверждается руководителем организации-исполнителя НИР. В техническом задании приводятся цель и задачи исследования, основные этапы, ожидаемые результаты, примерные объемы и сроки выполнения работы.

Выполнению НИР предшествует составление рабочей программы.

Р а б о ч а я п р о г р а м м а – документ, в котором излагаются цель и задачи исследований, более подробно, чем в техническом задании, рассматриваются содержание и основные этапы исследования, излагается методика их проведения, ожидаемые результаты, календарный план работ, потребные ресурсы, смета на проведение работ. Рабочая программа обычно составляется руководителем темы. Она, как правило, обсуждается, в нее вносятся

необходимые поправки и дополнения. Если разворачиваются крупные исследования, к обсуждению рабочей программы привлекается заказчик.

Все законченные научные результаты оцениваются только путем коллективного их обсуждения учеными соответствующих специальностей. В вузах и НИИ для этого существует специальный совещательный орган – ученый совет. В прикладных НИИ такой орган чаще именуется научно-техническим советом. Председателем совета обычно является первый руководитель научного учреждения или вуза (директор, ректор). Любые результаты НИР, как правило, не утверждаются и не оплачиваются без их одобрения ученым советом организации-исполнителя, а иногда требуют дополнительного одобрения техническим советом организации-заказчика. При выполнении крупных НИР на ученом (научно-техническом) совете рассматриваются также рабочие программы (как отмечалось, с приглашением представителей заказчика).

3.3. Основные этапы проведения НИР

НИР в различных отраслях деятельности отличаются исключительным многообразием, тем не менее у них имеется много общего. Прежде всего, это их структура, которая мало зависит от отраслевой принадлежности проводимых исследований. Упомянутый выше межгосударственный стандарт СНГ – ГОСТ 15.101–98 укрупненно выделяет четыре этапа:

- 1) выбор направления исследований на основе анализа состояния исследуемой проблемы;
- 2) теоретические и экспериментальные работы;
- 3) обобщение и оценка результатов;
- 4) предъявление работы к приемке и ее приемка.

Эти этапы могут разделяться на более мелкие части, по которым могут составляться отдельные отчеты. ГОСТ требует для каждой конкретной НИР определять необходимые этапы и указывать их в техническом задании.

Практика показывает, что для большинства фундаментальных и прикладных исследований технического направления наиболее удобно выделять в общем случае большее число этапов, например, шесть этапов, показанных на рисунке. Такое разделение, в общем, не противоречит приведенному выше стандартному разделению, но оно является более детализированным. Естественно, что в конкретных НИР названия этапов могут отличаться от приведенных на рисунке, а отдельные этапы вообще могут отсутствовать, но в целом структура любой НИР всегда в той или иной мере соответствует рисунку.



П о с т а н о в о ч н а я ч а с т ь включает анализ результатов поисковых исследований (если они проводились), обоснование направления исследований, составление рабочей программы и при необходимости защита ее на ученом совете.

А н а л и т и ч е с к и й о б з о р – это подробный критический анализ литературных данных, а в ряде случаев и патентов. Если до этого выполнялась поисковая работа, то такой обзор в распоряжении автора уже имеется, тем не менее вполне возможна его корректировка и дополнение. Если поисковая работа не проводилась, поиск и изучение необходимых источников выполняются в полном

объеме. Автор НИР должен познакомиться со всеми публикациями по изучаемому вопросу, которые вышли в свет, по крайней мере, за последние 10–15 лет во всем мире. Особого внимания требуют работы за последние 5–6 лет. Поиск необходимых источников ведется путем изучения различных библиографических указателей, реферативных журналов. Могут использоваться ссылки, содержащиеся в статьях или монографиях, устные сообщения коллег и т. д. Любая не замеченная автором публикация (отечественная или зарубежная) рассматривается как недостаток выполненного обзора.

Автор должен оценить степень изученности поставленных вопросов, рассмотреть наиболее интересные, с его точки зрения, результаты исследований, выявить существующие точки зрения на изучаемый вопрос, дать им свою оценку. На основании этого уточняется направление исследований, его задачи, в ряде случаев корректируется намеченная методика решения отдельных частных вопросов. Результаты аналитического обзора обычно приводятся в виде первой главы отчета о НИР, но в особых случаях по аналитическому обзору может составляться самостоятельный отчет.

Теоретические исследования предполагают решение поставленных задач математическим или логическим путем, что должно обеспечивать как можно более глубокое понимание сущности изучаемого процесса или явления. Тем не менее при любом уровне теоретических исследований их результаты подлежат обязательной экспериментальной проверке.

Экспериментальные исследования предполагают решение поставленных задач путем специально организованных измерений или наблюдений. По результатам экспериментальных исследований оценивается соответствие действительности (достоверность) теоретических результатов, выявляются новые закономерности, теоретически не изучавшиеся.

Анализ полученных данных и выводы являются важнейшим этапом НИР, определяющим ценность проведенной работы. На основании такого анализа оценивается достоверность теоретических результатов, выявляются новые закономер-

ности и факты, дается окончательная оценка всему комплексу полученных результатов и делаются выводы по всей проведенной работе.

3.4. Составление, оформление отчета о НИР или диссертационной работы

Все результаты научных исследований оформляются в виде отчета о НИР, который должен быть рассмотрен на ученом (научно-техническом) совете и утвержден первым руководителем организации (НИИ или вуза) или его заместителем по научной работе. Отчет должен содержать подробные сведения о проведенном исследовании: теоретические выкладки, эксперименты должны быть описаны во всех деталях. Статьи, монографии, составляемые на основании отчета о НИР, как правило, излагают лишь основные сведения о проведенных исследованиях, отчет же должен содержать всю полученную информацию. Отчет о НИР является документом служебного пользования, сторонние специалисты могут им пользоваться только с разрешения организации-исполнителя при государственном заказчике и с разрешения заказчика – при частном заказчике.

Структура и правила оформления отчета стандартизованы. Согласно межгосударственному стандарту СНГ ГОСТ 7.32–2001 отчет должен иметь определенные структурные элементы, среди которых обязательными являются титульный лист, реферат, введение, основная часть и заключение. При необходимости отчет дополняется списком исполнителей; содержанием; перечнем сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов; списком использованных источников; приложениями. Содержание каждого структурного элемента также регламентировано. Например, на титульном листе должны иметься полные сведения об исполнителе НИР (название организации-исполнителя, должности, ученые степени и звания руководителей организации и руководителя НИР), классификационные индексы (УДК, коды соответствующих клас-

сификаторов, номер отчета), грифы согласований и утверждения, место и дата составления НИР. Установлены требования к тексту, рисункам, таблицам и т. д.

Отчет о НИР прикладного направления обязательно должен содержать предложения по практическому применению полученных результатов. В дальнейшем, после необходимых уточнений и проверок, такие предложения могут быть доведены до уровня отдельного рекомендательного и даже нормативного документа.

Защита отчета происходит на ученом (научно-техническом) совете в обстановке свободной научной дискуссии, где все члены совета имеют одинаковые права, независимо от их званий и положения. Перед защитой отчет изучается специально назначенным рецензентом, в качестве которого выбирается компетентный по этому вопросу специалист. На заседании совета отзыв рецензента (с соответствующими замечаниями) обычно зачитывается после заслушивания выступления руководителя НИР, т. е. перед обсуждением содержания отчета.

Аналогичные правила существуют и для диссертационных работ. Они имеют примерно те же этапы, как и на рисунке, примерно так же оформляются полученные результаты, но требования к актуальности темы, к научно-методическому уровню исследований, к внедрению результатов – более высокие. Проверка и оценка результатов производится более тщательно. Перед окончательной защитой диссертация неоднократно заслушивается на заседании соответствующей кафедры вуза или лаборатории НИИ, неоднократно корректируется. Содержание диссертации обязательно должно быть опубликовано, в том числе издательствами, включенными в специальный список ВАКа. В отличие от оценки «обычного» отчета, при которой назначается один рецензент, для кандидатской диссертации назначаются два оппонента – доктор и кандидат наук, кроме того, диссертацию изучает и оценивает независимая организация (ведущая организация). Как правило, это научное учреждение. Содержание диссертации кратко излагается в виде брошюры (автореферат диссертации) и рассылается нескольким десяткам организаций, которые присылают свои отзывы с замечаниями.

Защита проходит публично, на ней могут присутствовать, задавать вопросы и выступать любые лица, заинтересовавшиеся диссертационной работой. Однако решение принимается тайным голосованием только членов диссертационного совета, которые принимают во внимание все высказанные мнения (отзывы оппонентов, отзывы на автореферат, выступления членов совета и присутствующих специалистов и т. д.).

Докторская диссертация обычно по объему в 2,5–3 раза больше кандидатской. Как правило, она содержит большой объем теоретического и экспериментального материала и охватывает крупную проблему, решение которой должно стать значительным шагом в развитии данной отрасли науки. При защите докторской диссертации назначаются три оппонента с докторской степенью и ведущая организация – достаточно известное в данной отрасли научное учреждение. Так же рассылаются авторефераты, по тем же правилам происходит защита, так же решение принимается тайным голосованием членов совета. Однако члены диссертационного совета и присутствующие специалисты обычно подходят с более жестких позиций к оценке содержания работы, которая должна быть крупным вкладом в науку и практику. Для защиты необходимы публикации основного содержания диссертации в специальных (установленных ВАКом) изданиях, желательна публикация монографии.

После защиты любой диссертации все материалы направляются на дополнительную экспертизу в ВАК, который принимает или отклоняет решение диссертационного совета о присуждении соответствующей ученой степени. С особой тщательностью ВАК изучает материалы докторских диссертаций.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ЧАСТЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

Теоретические исследования – часть НИР, в которой, как уже упоминалось, выдвинутые идеи изучаются математическим или логическим методами, причем главная задача таких исследований состоит в объяснении сущности изучаемых процессов или явлений. Они должны давать ответ на вопрос, почему происходит то или иное явление, каков его физический смысл, какие процессы за ним скрываются.

4.1. Моделирование

Моделирование играет важную роль, оно позволяет снизить затраты труда и средств на исследования, сократить сроки исследований и ускорить, например, проектирование и т. д. Часто моделирование является единственно возможным способом экспериментального исследования и решения практических задач. Моделирование позволяет решать практически любые задачи.

М о д е л ь – это устройство, воспроизводящее, имитирующее исследуемый объект-натуру в исследовательских целях.

М о д е л и р о в а н и е – это метод исследования объектов на их моделях или на реальных установках с применением методов теории подобия при постановке и обработке эксперимента. Это особая форма эксперимента, но экспериментируют не с самим объектом, а с его заменителем – моделью.

Объектом исследования или натурой может быть любой материальный объект, свойства которого нас интересуют, – это явления природы, технологические процессы, свойства материалов, кон-

струкции, параметры, характеристики, режимы работы и другие свойства различных сооружений, машин, механизмов, деталей и т. д.

Моделирование применяется в тех случаях, когда исследуемый объект-натура мало изучен, мало доступен, т. е. исследования на нем трудоемки и дороги или когда объекта еще не существует, так как он еще только создается и проектируется. Когда аналитическое решение задачи вообще невозможно, а для успешного проектирования объекта необходимы различные данные о его свойствах, то остается единственный путь решения – эксперимент.

Основной смысл моделирования заключается в том, чтобы по полученным данным экспериментов на моделях определить искомые данные о самих исследуемых натуральных объектах. Отсюда моделирование решает два основных вопроса: каким требованиям и условиям должна отвечать модель исследуемого объекта; как обрабатывать опытные данные, полученные при исследовании на этой модели.

4.2. Формы моделирования, типы моделей

В связи с большим разнообразием объектов исследования, различной сложностью и степенью изученности их, модели объектов также разнообразны.

Физические модели. Моделирование возникло вначале как физическое моделирование, когда модель имеет ту же физическую природу, что и исследуемый натуральный объект, и отличается от него лишь размерами (масштабом) – модель физически подобна натуре. При этом моделировании физические процессы в модели качественно одинаковы с физическими процессами в исследуемом натурном объекте. Часто бывает так, что хотя физическая модель внешне похожа на натуру и отличается от нее размерами, она может быть выполнена из другого материала и часто работает при механических, тепловых и других нагрузках, отличающихся от натуральных нагрузок. В этом случае качественные и количественные связи между такой моделью и натурой устанавливаются в виде масштабных отношений.

С помощью физических моделей можно решать большинство сложных задач проектирования различных конструкций, таких как строительные и портовые сооружения, самолеты, корабли, плотины и т. п. С помощью правильно спроектированных моделей можно анализировать поведение натуры в настоящем и будущем под влиянием различных воздействий и проверять в процессе разработки эффективность различных вариантов конструкции. Обычно размеры модели меньше, чем у натуры, что снижает ее стоимость и упрощает испытания, которые могут быть выполнены в лаборатории. Если необходимо, испытания моделей можно проводить вплоть до разрушения, в то время как возможности проведения таких испытаний на натурной конструкции ограничены. Кроме того, проведенные на моделях экспериментальные исследования дают информацию, полезную для формулировки общих закономерностей или эмпирических формул.

Аналоговые модели. В дальнейшем для моделирования стали использовать аналогии, существующие между законами природы у различных физических явлений. Появилось аналоговое моделирование. Оно представляет собой изучение какого-либо натурального процесса (объекта) методом аналогии, когда это изучение осуществляется путем экспериментального исследования качественно другого физического процесса (объекта), но описываемого такими же по форме математическими уравнениями, как и изучаемый натурный процесс [7].

При этом предполагается, что все параметры (полное подобие) или наиболее существенные параметры (локальное подобие) изучаемого натурального процесса в любой момент времени исследования и в любой точке отличаются от соответствующих параметров другого физического процесса (объекта), взятого за модель, в определенное число раз.

В качестве модели исследуемого процесса выбирается другой известный процесс, удобный с точки зрения изменений искомых величин и описываемый такой же (аналогичной) по форме системой уравнений или уравнениями, что и исследуемый объект. Такая аналоговая модель уже не подобна натуре физически, она качественно отлична от натуры. Наиболее удобны электрические модели.

Часто для изучения механических процессов используют аналогию между электрическими и механическими величинами одного из следующих видов.

Первый вид аналогии: электрический заряд – механическое перемещение; напряжение – сила; сила тока – скорость; индуктивность – масса; емкость – упругость.

Второй вид аналогии: магнитный поток – механическое перемещение; сила тока – сила; напряжение – скорость; индуктивность – упругость; емкость – масса.

Приведенные на рис. 4.1 схемы иллюстрируют использование второго вида аналогии для исследования процессов путем аналогового моделирования. У механической модели (рис. 4.1, *а*) m_1, m_2, m_3 – массы экипажа, подрессоренных деталей и колеса; c_1 и c_2 – жесткости рессорной пружины и шины; b_1 и b_2 – коэффициенты поглощения амортизации и демпфирования в шинах. У аналоговой модели (рис. 4.1, *б*) индуктивности c_1, c_2, c_3 заменяют массы, индуктивности L_1 и L_2 заменяют жесткости, сопротивления R_1 и R_2 заменяют коэффициенты поглощения.

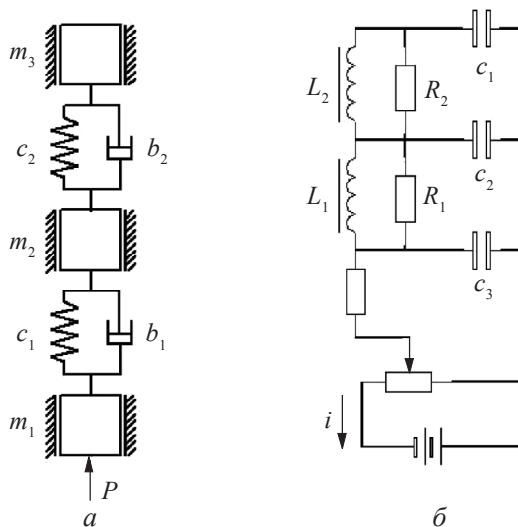


Рис. 4.1. Механическая система подвески автомобиля (*а*) и ее электрическая модель (*б*)

Метод аналогии позволяет моделировать без побочных факторов, имеющихся в натурном объекте и порой мешающих исследованию. В этом заключается его важное достоинство.


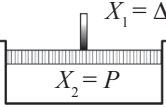
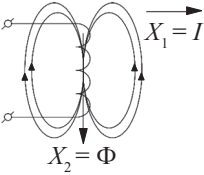
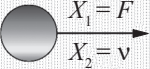
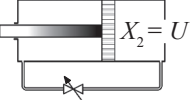
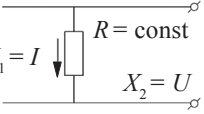
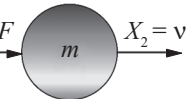

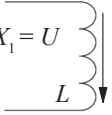

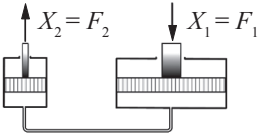
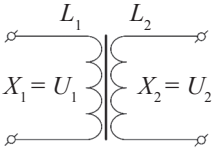
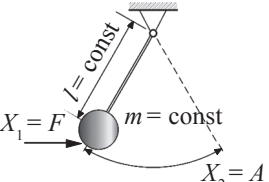

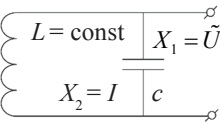
Аналогами являются, например, такие системы, как маятник и электрический колебательный контур, выходные величины которых (угол отклонения маятника от вертикали и напряжение на конденсаторе), будучи выведенными из равновесия, а затем предоставленные самим себе, совершают затухающие синусоидальные колебания.

Существование систем-аналогов является результатом наличия формального сходства между некоторыми чертами поведения гомоморфных моделей систем, различных по своей природе и устройству. Это сходство возникает только после достаточно далеко идущих упрощений в процессе построения гомоморфных моделей исходных систем. Если попытаться отказаться от некоторых упрощений, то аналогия может быть утрачена. Так, например, если учесть сухое трение в подвесе маятника или излучение электромагнитных волн в колебательном контуре, то формы движения координат маятника и электрического колебательного контура окажутся не аналогичными.

В табл. 4.1 показаны некоторые системы-аналоги, используемые для моделирования процессов.

М а т е м а т и ч е с к и е м о д е л и . Дальнейшее развитие метода аналогии привело к применению математического моделирования, основанного на тождественности уравнений, описывающих процессы в модели и у природы. Появились математические модели, которые представляют уже не устройства, как физические и аналоговые модели, а только математические описания, воспроизводящие, имитирующие исследуемый объект-натуру. Математическая модель может состоять из одного или более уравнений, описывающих поведение изучаемой системы. Эти уравнения выводятся из определенных фундаментальных законов и принципов обычно с привлечением упрощающих допущений. Число необходимых допущений часто можно снизить путем использования физической модели, которая представляет исследуемое явление в другом масштабе. Исследования на математических моделях могут проводиться «вручную» и при компьютерном моделировании.

Системы-аналоги

Механические аналоги	Пневмогидравлические аналоги	Электрические аналоги
$X_1 = \Delta l \longrightarrow X_2 = F$ 	$X_1 = \Delta l$ $X_2 = P$ 	
	$X_1 = F$ $X_2 = U$ 	$X_1 = I$ $R = \text{const}$ $X_2 = U$ 
$X_1 = F$ $X_2 = v$ 		
$X_1 = F_1$ $X_2 = F_2$ 		
		

Таким образом, существуют три основных разновидности моделей – физические, аналоговые и математические модели. Все они в настоящее время широко и успешно применяются в научно-технических исследованиях.

Все указанные модели, в свою очередь, различают по их содержанию. С этой точки зрения применяют следующие модели: полные и неполные, в зависимости от того, все или не все элементы натуры моделируются; точные и приближенные, в зависимости от точности перехода функций от объекта к модели; статические и динамические, в зависимости от скорости изменения состояния исследуемого объекта; детерминированные и вероятностные (стохастические), в зависимости от характера детерминированности параметров, характеризующих состояние объекта; комплексные и локальные, в зависимости от того, моделируется весь исследуемый объект или его часть.

Возможны и другие способы классификации моделей. Различные виды моделей (моделирования) не исключают, а взаимно дополняют и развивают друг друга, дают возможность выбора наиболее подходящей модели для данных конкретных условий исследования.

4.3. Кибернетическое представление модели

Вначале уточним используемые термины. В теории подобия, математическом моделировании и планировании эксперимента не существует единой, до конца установившейся терминологии, отчего возможна путаница и непонимание.

В е л и ч и н о й в технике называют такую характеристику объекта (процесса, явления, системы), которую можно измерить. Среди величин всегда имеются такие, которые в процессе исследования изменяют свои значения, поэтому они называются переменными в отличие от постоянных величин, или констант. Часто переменные самостоятельно или в виде комбинаций с другими величинами выступают в роли координат, используемых при построении графиков.

П а р а м е т р — это величина, определяющая геометрические, физические и другие характеристики системы, например, высота H , длина L , температура T , напряжение U и т. д. К числу параметров относятся и различные их комбинации, имеющие какой-либо смысл, например, отношение H/L .

В экспериментальных исследованиях часто применяют термин ф а к т о р, который будем считать синонимом термина «входной параметр»; употреблять оба термина будем равнозначно.

Обратимся к анализу параметрического уравнения

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k). \quad (4.1)$$

Наглядной формой представления этой модели служит кибернетический ящик (рис. 4.2). Управляющие параметры $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ входят в него по заданию и усмотрению исследователя, отсюда и названы входными, параметр y является выходным. Модель такого типа показывает, что входные параметры (факторы), засыпаемые в ящик, как на мельнице, перемалываются в некоторое значение выходного параметра y .

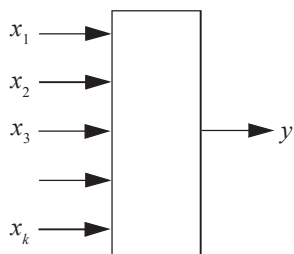


Рис. 4.2. Модель черного ящика

Математические выражения, осуществляющие это «перемалывание», являются устройством мельницы. При наличии дифференциальных или иных уравнений связи между входными и выходными параметрами устанавливаются на основе физических закономерностей в изучаемых процессах. Если уравнения отсутствуют, то модель называют черным ящиком, в таких моделях связи можно установить только статистическим путем на основе эксперимента. При этом не раскрывается физическая природа таких связей. Чем сложнее объект, тем чаще мы имеем дело с черным ящиком и строим статистические модели. За основу таких построений приняты измерения.

Измерением называется один акт определения численного значения любого входного x_i или выходного y параметра. Измерение осуществляется в размерных единицах – метрах (м), килограммах (кг), секундах (с), вольтах (В), ньютонах (Н) и т. п.

Один акт измерения всех входных и выходного параметров в уравнении (4.1) называется **опытом**. В каждом опыте содержится только один определенный набор значений входных и выходного параметров. Иногда в опытах полезно указывать не только значения входных параметров, но и их порядковый номер по осевой шкале, т. е. уровень изменения каждого фактора. В совокупности все опыты образуют **эксперимент**. **Точкой эксперимента**, или **узловой точкой** (**узлом**), будем называть фиксированный набор входных параметров, соответствующий одному опыту. Таким образом, опыты проводятся в узловых точках эксперимента. В любой узловой точке можно провести несколько опытов. Такое дублирование необходимо для того, чтобы оценить воспроизводимость эксперимента и степень разброса данных при ней. Таким образом, для того чтобы получить количественную оценку воспроизводимости эксперимента, необходимо хотя бы в одной точке (а может быть, и не только в одной, а даже во всех) провести несколько опытов.

4.4. Геометрическое представление модели

Параметрическую модель (4.1) можно представить в геометрическом виде. Допустим, имеется только один входной параметр x_1 :

$$y = f(x_1). \quad (4.2)$$

Это однофакторный эксперимент, количество входных параметров $k = 1$.

График зависимости (4.2) будем трактовать как поверхность в одномерном пространстве (рис. 4.3, а).

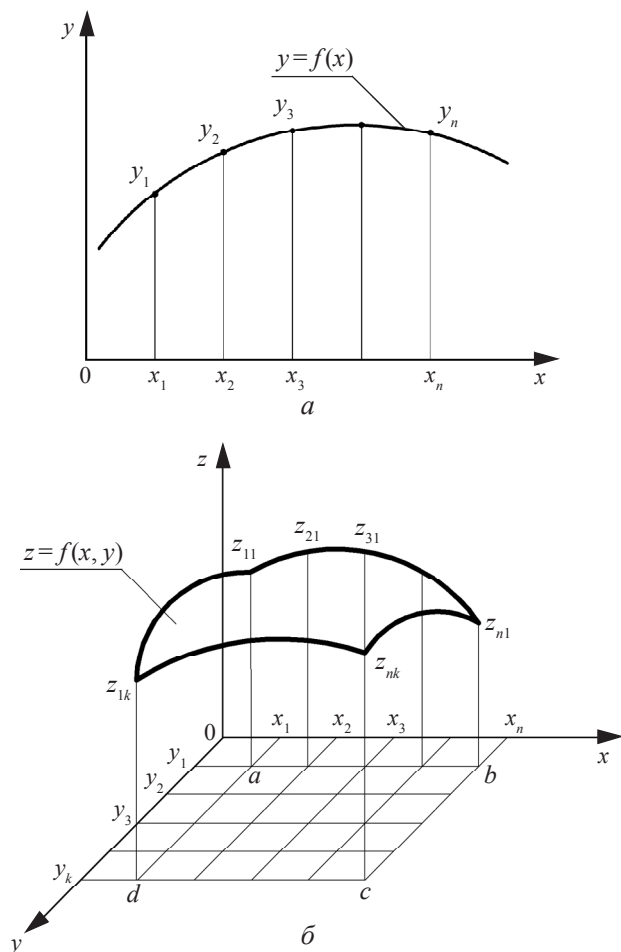


Рис. 4.3. Однофакторный (а) и двухфакторный (б) эксперименты

На рис. 4.3, б количество факторов два: $k = 2$. Зависимость

$$y = f(x_1, x_2) \quad (4.3)$$

представляет собой уравнение поверхности, нависшей над плоскостью координат $x_1 - x_2$, построенной по значениям y . В одномерном пространстве существовали две взаимно перпендикулярные

координатные оси, в двумерном пространстве таких осей три. В любом k -мерном пространстве необходимо иметь k взаимно перпендикулярных осей для входных параметров и одну перпендикулярную всем предыдущим ось, по которой будет откладываться значение отклика y . Полученная таким способом поверхность представляет собой гиперповерхность в k -мерном пространстве. Физически построить ее нельзя, но по аналогии с одно- и двумерным случаем можно представить в виде некоторой логической конструкции.

Таким образом, параметрическое уравнение (4.1) есть гиперповерхность в k -мерном пространстве, и в геометрическом плане задача эксперимента сводится к построению такой гиперповерхности.

4.5. Основные понятия теории подобия и размерностей

4.5.1. Характеристика входных и выходного параметров

Входные параметры можно классифицировать по разным признакам. По одному мы их уже разделили: факторы бывают значимыми и незначимыми, или, что то же самое, существенными и несущественными. Правда, количественной характеристики критерия, по которому производится такое разделение, мы пока не знаем. При изучении дисперсионного анализа критерий будет сформулирован.

Входные и выходной параметры – это величины измеряемые, следовательно, содержат в себе некоторую ошибку измерения. Будем считать, что все входные параметры измеряются точно, значения их в эксперименте равны тем, которые мы запланировали. Ошибка в измерении входных параметров равна 0, эти параметры детерминированы. Выходной параметр y , наоборот, измеряется с ошибкой, т. е. является величиной статистической, вероятностной. При одном и том же наборе значений входных параметров в каждом опыте мы можем получать разные значения, отклоняющиеся от истинного (среднего) на некоторую величину $\pm \Delta y$. Считается, что эти отклонения происходят из-за многих мелких случайностей и подчиняются нормальному закону распределения.

Отклонения в значениях y от среднего (при нормальном законе распределения) возможны не только из-за ошибок измерения, но и по другим случайным причинам. Например, если в опыте входные параметры на запланированных уровнях установлены не совсем точно, то ошибка повлияет на значение y . Отклонения входных параметров от точных значений рассматриваются как очередная случайность, повлиявшая на значение y . Таким образом, в отличие от детерминированных входных параметров выходной параметр y является вероятностной, или, по терминологии математической теории вероятности, случайной величиной.

Нормальный закон распределения основан на том, что мелких случайностей в опытах много и каждая в определенной степени воздействует на величину y . Какая-либо случайность может проявляться в одних и не проявляться в других опытах. Доказательства нормальности распределения величины y не требуется, если она измеряется в каких-то физических единицах измерения и точность ее измерения полностью зависит от условий проведения опыта.

Если показано, что величина y распределена не по нормальному (или логнормальному) закону, то можно определенно утверждать: мы столкнулись с одним из двух случаев. Во-первых, мы можем иметь дело со случайной величиной y иной природы, чем нормально распределенная. Чтобы лучше понять природу величины, подчиняющуюся нормальному закону распределения, приведем пример случайной величины иной природы. Пусть подлечит исследованию время от одной до другой поломки нагревательной печи в прокатном цехе. В том, что это время – величина случайная, сомнений нет, но оно не будет зависеть от точности часов, с помощью которых измеряется. Можно попытаться стабилизировать условия проведения измерения и исключить здесь мелкие случайности, но от этого время между поломками печи не изменится. В данном случае время – случайная величина другой природы. Это так называемая Марковская величина, случайность которой определяется не условиями измерения, а тем процессом, который она описывает (в нашем случае – условиями эксплуатации печи). Часто

величины такой природы не измеряются физическими единицами, а нумеруется в штуках, типах, днях недели и т. п. (например, тип станка, количество автомобилей, число поломок печи в месяц).

Во-вторых, искажение нормальности закона распределения случайной величины y может произойти по вине неучтенных в эксперименте существенных факторов, которые не случайным образом воздействуют на значение y , а систематически в каждом опыте проявляют себя. Например, если измеряется температура в печи с помощью термопары и температура ее холодного спая не фиксируется, то при постоянной температуре в печи по мере разогрева холодного спая показания прибора изменяются непрерывно от одного опыта к другому. Закон изменения будет отличным от нормального. Температура холодного спая термопары – это не случайный, а систематический фактор. Такие систематические факторы ведут себя как обычные существенные параметры.

В общем случае отклонение Δy от среднего значения можно представить в следующем виде:

$$\Delta y = f_1(x_1, x_2, \dots, x_p) + f_2(x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_s), \quad (4.4)$$

где x_1, x_2, \dots, x_p – систематические факторы, а $x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_s$ – случайные факторы. В первую группу входят существенные факторы, влияющие на процесс. Среди них присутствуют все те, которые мы сознательно включили в число существенных. Но есть и такие, которые, будучи существенными, в эксперимент не включены по невнимательности или незнанию. При наличии последних показания прибора, измеряющего y , при постоянных значениях всех существенных факторов демонстрируют функциональную зависимость от порядкового номера измерения (от $i = 1$ до n – рис. 4.4).

Эта зависимость называется т р е н д о м. Если выделить тренд, т. е. из каждого измеряемого значения y вычесть значение тренда, то останется только случайная составляющая $f_2(x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_s)$, которая должна обеспечить нормальный закон распределения. Случайной нормально распределенной величиной будут не y , а разность $(y - \hat{y})$ между экспериментальными значениями y и значениями \hat{y} , лежащими на кривой.

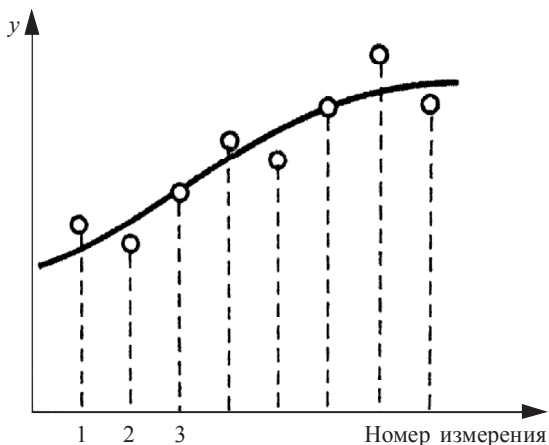


Рис. 4.4. Показания прибора при наличии тренда

В общем случае любой существенный входной параметр можно рассматривать как тренд. На анализе величины этого тренда построен, по существу, весь регрессионный и дисперсионный анализ.

Вернемся к терминологии. Ранее мы в двух значениях упомянули термин «случайный». В первом значении случайной величиной называется параметр, имеющий вероятностный характер. Это дань математической теорий вероятности. Такая случайная величина может быть нормально распределенной или иметь иную природу и другой закон распределения. Во втором значении случайной величиной называется параметр, который случайным образом появился в том или ином измерении. В другом измерении он может уже не проявить себя. Это те параметры $x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_s$, которые входят в приведенную выше зависимость Δy . Далее мы также будем употреблять термин «случайный» в обоих значениях, но из контекста всегда будет ясно, в каком значении этот термин применяется.

4.5.2. Теорема о существенных параметрах

При постановке задачи опасно не включить в исследование какой-либо существенный параметр, при этом результат исследования в целом может быть искаженным. С другой стороны, нет

смысла включать в эксперимент и несущественные факторы, так как это только удорожает исследование. Теорема о существенных параметрах позволяет разрешить данную проблему. Если для изучаемого процесса имеется математическая модель, т. е. записаны математические уравнения, то в них содержится полный набор существенных параметров и отсутствуют несущественные параметры.

Эту теорему можно рассматривать как частный случай теоремы информатики, которая требует, чтобы в математическом описании процесса обязательно была отражена вся существенная информация о нем (иначе нет смысла в таком описании).

Рассмотрим известную задачу о колебании маятника весом mg (здесь m – масса маятника и g – ускорение силы тяжести), подвешенного на упругой нити длиной l , отклоненного от вертикали на угол φ_0 (рис. 4.5). Уравнение движения маятника описывает изменение текущего угла φ во времени:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \varphi. \quad (4.5)$$

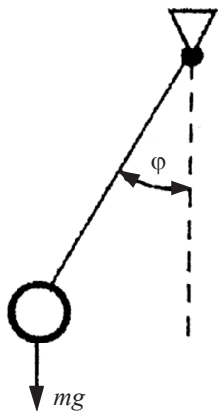


Рис. 4.5. Колебание маятника

Если в качестве выходного параметра принять угол φ , т. е. если изучать характеристики движения маятника, то будем иметь параметрическое уравнение $\varphi = f(t, g, l)$. Если выходным параметром

станет время, например, период колебания маятника T , равный времени прохождения двойного угла φ_0 , то получим параметрическое уравнение

$$T = f(\varphi_0, g, l). \quad (4.6)$$

В уравнениях (4.5) и (4.6) масса маятника m отсутствует. Как для угла φ , так и для периода колебания T этот параметр несущественный. Получен важный результат без решения уравнения, только путем его параметрического анализа.

Если изучать натяжение нити N , то из уравнения натяжения

$$ml \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = N - mg \cos \varphi \quad (4.7)$$

получим параметрическое уравнение $N = f(m, g, l, \varphi)$.

Для натяжения нити масса маятника – параметр существенный.

Таким образом, при наличии математической модели или закона экспериментатор чувствует себя уверенно и в какой-то мере застрахован от пропуска существенных и записи несущественных параметров (конечно, при условии, что модель верна). А как быть в том случае, когда модели нет и трудно ее получить? Видимо, опыт экспериментатора, некоторые предварительные сведения и интуиция могут сыграть решающую роль в формировании набора существенных параметров процесса. Но всегда, пока не получена достоверная модель процесса, у исследователя должно оставаться сомнение в том, что эксперимент поставлен правильно и все существенные параметры определены полностью. Может быть, лучше подстраховаться и включить в исходную параметрическую модель (4.1) и те параметры, в значимости которых нет уверенности.

Необходимо заметить, что некоторые параметры могут быть существенными в одних условиях и несущественными в других. Например, сопротивление воздуха оказывает малое влияние на летные характеристики самолета при малых скоростях полета, но становится весьма существенным при скоростях, близких к звуковым. Та область значений параметров, при которой какой-либо параметр перестает влиять на процесс, называется областью

а в т о м о д е л ь н о с т и. В теории подобия область автомодельности играет особую роль, поиск ее может стать предметом самостоятельного исследования.

4.5.3. Размерные и безразмерные величины

Мы знаем все основные единицы, которые используются при рассмотрении конструкций машин. Эти единицы можно разделить на три группы: единицы длины, единицы массы и единицы времени. Сложные единицы измерения можно получить, комбинируя основные единицы. Сложная единица измерения может включать и длину, и массу, или, например, длину и время, или все три – длину, массу и время.

Для того чтобы нам не потеряться во всех этих комбинациях, вводится понятие «размерность». Если измеряемая величина выражается в единицах массы, то речь идет о размерности M (масса). Если измерения делают в единицах длины, то размерность величин L , а если упоминают единицы времени, то размерность величин T .

Две любые единицы с одинаковыми размерностями можно складывать и вычитать, пользуясь обычными правилами арифметики.

Например, можно складывать любые единицы длины. Мы легко можем найти сумму 2 версты + 6 миль + 4 километра, ведь мы знаем коэффициенты перевода одной единицы в другую. Так же можно сложить 5 килограммов и 320 граммов или 3 часа и 75 минут.

Но совершенно невозможно складывать или вычитать величины с разными размерностями. Мы не можем прибавить 2 килограмма к 5 сантиметрам или 6 дней к 2 тоннам. Между единицами с разными размерностями нет коэффициентов перевода.

Возможно, на первый взгляд, это кажется нам совершенно очевидным. Ведь никто и не пытается складывать граммы с минутами или вычитать сантиметры из литров. Но как только мы переходим к более сложным единицам, которые характеризуют изучаемые нами процессы, ответ на этот вопрос уже не будет таким очевидным. Когда ученые и инженеры проводят свои измерения,

им нужно очень тщательно выбирать размерности, чтобы не получилось нечто подобное сложению миллиметров с граммами.

Тщательная проверка размерностей, в которых проводятся измерения, называется **а н а л и з о м р а з м е р н о с т е й**.

Для того чтобы анализ размерностей был наименее трудоемким, лучше выбирать одну единицу измерения для каждой из трех групп размерностей. Если мы поступаем таким образом, то можем концентрировать внимание на самих размерностях и не заниматься переводом одних единиц в другие. Разумеется, нам придется решить, какую именно единицу измерения эффективнее применять в данном случае.

Когда речь идет об измерении времени, все достаточно просто. Уже давно все пришли к выводу, что удобнее пользоваться секундой как единицей измерения.

В случае массы и длины существует по три единицы, которые широко используются в повседневной жизни. Две системы единиц – из метрической системы. В первой в качестве единицы длины используют сантиметр, а в качестве единицы массы – грамм, а во второй системе используют метр и килограмм. Третья система используется только в англоязычных странах. В качестве единицы массы используется фунт, а в качестве единицы длины – фут.

Рассмотрим единицы площади. Для того чтобы вычислить площадь прямоугольника, нужно перемножить длины двух смежных сторон прямоугольника. Для того чтобы определить площадь треугольника, нужно умножить половину длины одной из его сторон на высоту треугольника, опущенную на эту сторону из вершины противоположного угла. Когда мы вычисляем площади других фигур, детали несколько меняются, но суть остается прежней – мы перемножаем длины двух отрезков.

В общем случае связь между входными и выходными параметрами выражается параметрическим уравнением (4.1). Параметры, входящие в него, могут быть:

- первичными размерными;
- вторичными размерными;
- безразмерными.

Величины, используемые в экспериментальной механике твердого деформируемого тела, условно можно разбить на размерные и безразмерные. Величины, численное значение которых зависит от принятых масштабов, т. е. от системы единиц измерения, называют **р а з м е р н ы м и**.

Величины, численное значение которых не зависит от применяемой системы единиц измерения, называют **б е з р а з м е р н ы м и**.

Первоначально все входные и выходные параметры измеряются приборами и инструментами в виде размерных величин в стандартных единицах измерения – метрах (м), секундах (с), граммах (г), вольтах (В) и т. д. Стандартные единицы измерения объединены в международную систему СИ (есть и другие системы). В эксперименте необходимо использовать только стандартные единицы измерения (только метр, но не аршин или дюйм, хотя в быту могут быть использованы и эти единицы).

Вторичные размерные величины образуются из первичных размерных величин и представляют собой комплексы, имеющие некоторый физический смысл. Соответственно, размерности этих величин образуются как комбинация стандартных размерностей. Например, площадь с размерностью м^2 , сила – гм/с^2 , скорость – м/с и т. д. В теории подобия доказывается теорема – ее, как и все остальные теоремы, примем без доказательств, – утверждающая, что любая вторичная размерность образуется из первичных путем их перемножения и возведения в степень. Если первичные размерности в общем виде обозначить латинскими буквами M, L, T, P , то размерность $[a]$ любой вторичной величины a будет выражаться формулой

$$[a] = M^a L^b T^c P^d, \quad (4.8)$$

где a, b, c, d – степени при первичных размерностях.

Можно записать:

$$[Q] = \text{м}^2 = M^2 L^0 T^0 P^0 \text{ – размерность площади;}$$

$$[F] = \text{гм/с}^2 = M^1 L^{-2} T^1 P^0 \text{ – размерность силы;}$$

$$[Q] = \text{м/с} = M^1 L^{-1} T^0 P^0 \text{ – размерность скорости.}$$

По этой теореме, как следствие, нельзя складывать или вычитать разные размерности.

Каждая конкретная задача в первоначальном виде, т. е. на стадии формирования параметрического уравнения (4.1), содержит определенный набор входных и выходных параметров с первичными и вторичными размерностями для данной задачи. Из этого ряда всегда можно выделить зависимые и независимые размерности. Независимыми будут такие размерности, которые нельзя образовать друг из друга. Так, все первичные, а также часть вторичных размерностей могут быть отнесены к независимым. Зависимые размерности образуются из независимых по формуле (4.8) и всегда вторичны.

Часто и параметры, имеющие независимую размерность, называют независимыми. Однако в задаче может быть несколько параметров с одинаковыми независимыми размерностями (например, длина, ширина и высота с одной размерностью m). Только один из них (любой) считают независимым. Выходной параметр всегда имеет зависимую размерность.

Например, рассмотрим некоторую задачу, имеющую шесть выходных параметров $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ с размерностями соответственно $m, m, c, \text{гм/с}, \text{г/с}, \text{м/с}$. Независимыми размерностями признаем $m, c, \text{г/с}$. Остальные размерности можно образовать из этих размерностей, поэтому они становятся зависимыми. Имеется теорема, согласно которой из приведенного ряда в качестве независимых можно выбрать любые размерности, причем количество независимых размерностей при этом не изменяется (в нашем случае три).

В параметрическое уравнение (4.1) помимо параметров, имеющих первичные и вторичные размерности, могут входить безразмерные параметры. Их следует рассматривать как частный случай вторичных размерных величин, когда входящие в уравнение (4.8) размерности взаимно сокращаются (размерность числителя равна размерности знаменателя). Некоторые из таких величин по определению безразмерны, хотя в основе своей они всегда представляют собой некоторые комплексы из первичных размерных величин. Например, коэффициент трения как безразмерная величина образовался как отношение силы трения к нормальной силе. Радян –

это отношение длины дуги окружности к радиусу, поэтому он безразмерный. Кстати, угол, измеряемый в градусах (единицах измерения угла), также может рассматриваться как величина безразмерная, так как градус представляет собой отношение длины определенной дуги к длине окружности. С этих позиций и параметры, измеряемые метрами, можно трактовать как безразмерные величины, поскольку метр определен как некая доля длины меридиана. Другие стандартные единицы измерения также являются стандартизированными порциями измеряемых величин. Видимо, четко очерченных границ между размерными и безразмерными величинами нет.

Рассмотрим случай, когда аналитическое описание моделируемого объекта неизвестно, отсутствует предварительная информация об изучаемом объекте, т. е. нет уравнений, описывающих объект. В таком случае начать моделирование с аналитического описания объекта мы не можем. В этом случае необходимо путем проведения серии экспериментов сначала вывести уравнения, описывающие объект.

Анализ размерностей позволяет сократить число переменных, которые необходимо варьировать от опыта к опыту, без ущерба для полноты полученных результатов.

Т а б л и ц а 4.2

Основные единицы физических величин

Наименование физической величины	Размерность	Единица измерения	Обозначение
Длина	L	метр	м
Масса	M	килограмм	кг
Время	T	секунда	с
Электрический ток (сила электрического тока)	I	ампер	А
Термодинамическая температура	θ	кельвин	К
Количество вещества	N	моль	кд
Сила света	J	кандела	моль

Выше отмечено, что различные физические величины связаны между собой определенными соотношениями. Это позволяет принять некоторые из них за основные и установить для них какие-либо единицы измерения, а для всех остальных величин единицы измерения выразить через единицы измерения основных величин. Принятые для основных величин единицы измерения называются основными, а все остальные – производными. Основные единицы измерения являются простейшими, они не могут быть выражены одна через другую или сведены к еще более простым единицам. Единицы измерения различных физических величин, объединенные на основе их непротиворечивости друг другу, образуют систему единиц измерения. Наиболее распространенной и имеющей предпочтительное применение является Международная система единиц СИ. На применение Международной системы единиц имеется ГОСТ 8.417–2002. Единицы величин. Введен в действие с 1 сентября 2003 г.

В рамках СИ считается, что эти единицы имеют независимую размерность, т. е. ни одна из основных единиц не может быть получена из других.

Производные единицы получаются из основных с помощью алгебраических действий, таких как умножение и деление. Некоторым из производных единиц в СИ присвоены собственные названия.

Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется, или определения физической величины, для которой она вводится.

Рассмотрим основной постулат теории размерностей.

Отношение значений двух подобных величин не зависит от системы единиц, используемой при их измерении.

Например, если длина и ширина стола соответственно составляют 3 и 1 м, то отношение длины к ширине равно 3, и если длина и ширина измеряются в футах, то отношение также равно 3. На основе этого постулата можно показать, что размерность любой производной величины S можно выразить (4.8) или в виде $S \doteq L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}$, где показатели степени имеют значения 0, 1, 2 и т. д.

Второй постулат, на котором основан анализ размерностей, гласит, что форма уравнения, описывающего некоторое явление, не зависит от выбора системы единиц, используемой при измерении исследуемых величин.

Например, нормальное напряжение σ в стержне с поперечным сечением A , нагруженном осевой силой P , определяется уравнени-

ем $\sigma = \frac{P}{A}$, и это уравнение справедливо независимо от единиц, вы-

бранных для измерения P и A . Такие уравнения называются полными. Полные уравнения, в свою очередь, являются размерно однородными (т. е. размерности всех членов уравнения одинаковы). Например, уравнение для скорости V тела, движущегося равноускоренно, имеет вид:

$$V = V_0 + at, \quad (4.9)$$

где V_0 – начальная скорость; a – ускорение; t – время. С помощью размерностей это уравнение можно представить в виде

$$LT^{-1} \doteq LT^{-1} + LT^{-1}. \quad (4.10)$$

Некоторые уравнения содержат постоянные, имеющие размерности. Уравнение, определяющее путь d , пройденный свободно падающим телом, можно записать в виде

$$d = 16,1t^2. \quad (4.11)$$

Проверка размерностей выявляет, что для того, чтобы уравнение имело однородную размерность, постоянная должна иметь размерность LT^{-2} . Действительно, уравнение (4.11) представляет частный случай хорошо известного из физики уравнения свободного падения тела:

$$d = g \cdot t^2/2, \quad (4.12)$$

где g – ускорение свободного падения тела. Уравнение (4.12) имеет однородную размерность и справедливо для любой системы единиц. При $g = 32,2 \text{ м/с}^2$ это уравнение сводится к уравнению (4.11), и поэтому данное уравнение справедливо только для системы единиц, в которой используются и футы, и секунды.

Уравнения, справедливость которых ограничивается использованием определенной системы единиц измерения, можно назвать ограниченно однородными уравнениями, в противоположность полным уравнениям, которые являются полностью размернооднородными уравнениями.

4.5.4. Теорема подобия (π -теорема)

« π -Теорема» гласит: если уравнение с k переменными полное, его можно свести к соотношению между $k - n$ независимыми безразмерными величинами, где n – число основных размерностей, необходимых для описания переменных.

Безразмерные величины обычно обозначают буквой π , а приведенное выше утверждение называют теоремой Бакингема или просто « π -теоремой». «Экзотическое» название теоремы объясняется весьма прозаично: автор (точнее, один из авторов) теоремы Э. Бакингом для обозначения безразмерных комбинаций (комплексов) использовал греческую букву π .

Рассмотрим вывод сформулированной теоремы.

Обычно в любой задаче с несколькими переменными u , v , w и т. д. можно предположить, что существует некоторая функциональная зависимость между ними:

$$H(u, v, w, \dots) = 0. \quad (4.13)$$

Второй постулат, сформулированный ранее, гласит, что вид частного уравнения, выражающего данное соотношение, не должен зависеть от выбора системы единиц, используемой при измерении различных величин, входящих в него, т. е. уравнение (4.13) полное. Из этого постулата следует, что величины, характеризующие некоторое физическое явление, должны сочетаться определенным образом, как показано в последующем анализе. Величины, характеризующие какую-либо из них (например, ускорение силы тяжести) могут быть постоянными. Таким образом, при использовании термина «переменная» будем понимать любую величину, включая размерные и безразмерные постоянные.

Размерности переменных величин можно выразить через размерности основных величин:

$$u \doteq L^{u_1} M^{u_2} T^{u_3}; \quad v \doteq L^{v_1} M^{v_2} T^{v_3}; \quad w \doteq L^{w_1} M^{w_2} T^{w_3} \quad \text{и т. д.,}$$

где для простоты приняты только три основные размерности. Затем выбираем одну из переменных (например, u), которая связана с основной размерностью L , и определяем новую систему переменных:

$$v' \doteq v / (u)^{v_1/u_1}; \quad w' \doteq w / (u)^{w_1/u_1} \quad \text{и т. д.}$$

Отметим, что в новых переменных со штрихом основная размерность L исключается:

$$u, v' \doteq M^{v'_2} T^{v'_3}; \quad w' \doteq M^{w'_2} T^{w'_3} \quad \text{и т. д.}$$

Уравнение (4.13) теперь можно записать в виде

$$H[u, v'(u)^{v_1/u_1}, w'(u)^{w_1/u_1}, \dots] = 0. \quad (4.14)$$

Используемая для измерения основной размерности L система единиц изменилась. Однако на функцию H может влиять только переменная u , так как переменные со штрихом не зависят от L . Так как предполагается, что уравнение (4.13) полное, оно не зависит от системы используемых единиц. Таким образом, имеет место случай, когда u меняется, а функция H остается постоянной. Поэтому функция H , записанная через переменные со штрихом, не должна зависеть от u ; следовательно,

$$H[u, v'(u)^{v_1/u_1}, w'(u)^{w_1/u_1}, \dots] = P(v', w', \dots) = 0. \quad (4.15)$$

Затем процесс повторяется, чтобы исключить основную размерность M путем определения новой системы переменных:

$$v', w'' = \frac{w'}{(v')^{w'_2/v'_2}} \quad \text{и т. д.}$$

Переменные с двумя штрихами теперь не зависят от основной размерности M и уравнение (4.15) записывается в виде

$$P[v', w''(v')^{w'_2/v'_2}, \dots] = Q(w'', \dots). \quad (4.16)$$

Эту процедуру используем для каждой основной размерности, так что

$$H(u, v, w, \dots) = \varphi(\pi_1, \pi_2, \dots) = 0, \quad (4.17)$$

где окончательные переменные π_1, π_2 и т. д. безразмерные и их число меньше начального числа переменных по отношению к количеству основных размерностей.

Следует отметить, что (4.17) можно точно решить для любого π -члена:

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \dots), \quad (4.18)$$

и каждый из π -членов будет иметь общий вид $q / u^{a_i} v^{b_i} w^{c_i}$, где q_i — любая переменная из их первоначального набора. Таким образом, уравнение (4.18) можно также выразить в виде

$$q = u^{a_i} v^{b_i} w^{c_i} \dots \varphi(\pi_2, \pi_3, \dots). \quad (4.19)$$

Так как функция φ включает только безразмерные члены, то все члены в правой части уравнения (4.19) будут иметь те же размерности, что и q_i . Поэтому ясно, что все такие уравнения имеют однородную размерность.

π -Теорема широко используется при проведении экспериментальных исследований. Прежде всего она дисциплинирует исследователя, утверждая, что переход от размерных параметров к безразмерным осуществим всегда. Если в каком-то случае этого сделать не удастся, значит, в исследовании пропущены какие-то существенные параметры с недостающей размерностью. Более того, π -теорема признает неграмотной запись такого уравнения, в котором наряду с безразмерными встречаются и некоторые размерные параметры, хотя с точки зрения эксперимента здесь нет никакой ошибки.

π -Теорема обязывает, чтобы перед началом эксперимента все параметры исходного параметрического уравнения всегда преобразовывались в безразмерные. При этом эксперимент упрощается, так как не все равно, какое количество входных параметров участвует в эксперименте — k или $k - n$. Чем меньше входных параметров, тем эксперимент дешевле.

Наконец, безразмерные параметры характеризуют объект в более общей форме, чем размерные. Например, если исследуется некоторый параллелепипед в размерных параметрах – высота H , ширина B и длина L , то выводы о нем будут справедливыми только в пределах этого параллелепипеда. Но если ввести безразмерные параметры B/H и L/H , то выводы, полученные в эксперименте, распространяются на целый класс подобных параллелепипедов.

Рассмотрим пример. Вернемся к маятнику (см. рис. 4.5) и с позиций π -теоремы рассмотрим задачу о периоде T его колебания. Ранее было записано параметрическое уравнение (4.6):

$$T = f(\varphi_0, g, l).$$

Параметр φ_0 безразмерный, и функция от него также безразмерна, поэтому можно предложить несколько форм записи параметрического уравнения, например:

$$T = f_1(\varphi_0) f_2(g, l) \text{ или } \varphi_0 = f_3(T, g, l) \text{ и т. п.}$$

Остановимся на последней как более удобной.

Размерности величин в правой части таковы: $[T] = \text{с}$, $[l] = \text{м}^2$, $[g] = \text{м}/\text{с}^2$. Две первые размерности независимые, а третья зависимая. Имеем $k = 3$, $n = 2$, и возможна единственная комбинация всех трех параметров, которая будет безразмерной:

$$\varphi_0 = f_4(T^2 g / l). \quad (4.20)$$

Задача подготовлена для экспериментального определения периода колебания маятника: теперь достаточно построить график – по одной оси отложить несколько произвольных значений угла φ_0 , а по другой – значение комплекса $T^2 g / l$, в котором время прохождения маятником полного периода колебаний T (двойного угла φ_0) измеряется с помощью секундомера. Решение задачи о периоде колебания маятника получено в виде графика (рис. 4.6). Обязательно следует подчеркнуть, что оно достигнуто экспериментально. Для данной задачи известно и теоретическое решение, полученное путем математического решения уравнения колебания маятника (4.5):

$$T = 2\pi\sqrt{g/l}.$$

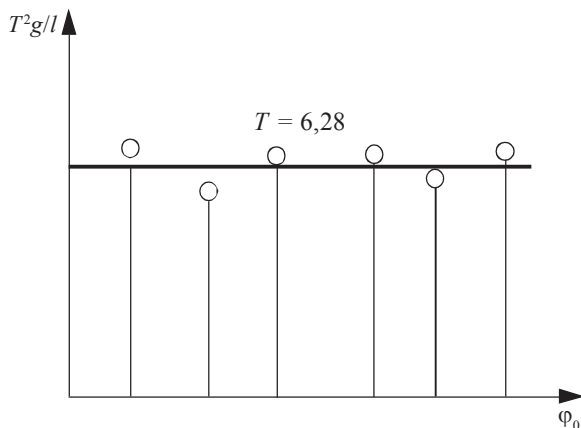


Рис. 4.6. Экспериментальное решение задачи о периоде колебания маятника

Экспериментальное значение функции $f_1(\varphi_0)$ будет близким к постоянному значению 6,28.

Рассматривая задачу о колебании маятника, можно подумать, что экспериментальный путь решения менее эффективен, чем математический. Для данной задачи это, видимо, так. Но для более сложных задач он может быть не только эффективным, но и единственным.

4.5.5. Примеры решения задач с применением π -теоремы

Порядок решения задач на π -теорему:

- 1) составить список всех переменных, входящих в задачу, и выразить размерности этих переменных через основные размерности;
- 2) выбрать повторяющиеся переменные, число которых равно числу основных размерностей, необходимых для описания всех переменных:

- все основные размерности должны заключаться в пределах группы повторяющихся переменных;
- каждая повторяющаяся переменная должна быть независима по размерности от других (т. е. размерность одной повторяющейся переменной не может быть воспроизведена с помощью

некоторой комбинации произведений степеней остальных повторяющихся переменных);

3) сформировать безразмерную величину путем деления одной из неповторяющихся переменных на произведение повторяющихся переменных, степени которых выбираются таким образом, чтобы их комбинация была безразмерной;

4) повторить этап 3 для каждой из оставшихся неповторяющихся переменных.

Рассмотрим задачу об определении аналитической связи между путем S , проходимым свободно падающим телом, временем его падения t и другими обстоятельствами. Галилей экспериментально доказал, что этот путь можно определить по формуле

$$S = gt^2/2, \quad (4.21)$$

где g – ускорение силы тяжести. Выведем формулу (4.21), применив метод анализа размерностей. При попытке экспериментально определить эту зависимость нужно было бы априорно в результате размышлений перечислить факторы, от которых может зависеть S , затем организовать серию экспериментов с фиксацией изменения S в зависимости от этих факторов и, наконец, попытаться аппроксимировать опытные данные аналитической зависимостью.

Первым этапом решения поставленной задачи методом анализа размерностей является априорное, интуитивное выявление физических величин, от которых может зависеть изучаемое явление. Можно полагать, что S зависит от t и от g . Итак, будем считать, что S является неизвестной и искомой функцией вида

$$S = f(g, t). \quad (4.22)$$

Вид функции (4.22) можно определить таким образом: избрать диапазон изменения g и t ; назначить значения этих аргументов в указанном диапазоне (допустим, назначить i значений g и j значений t); при всех сочетаниях назначенных g и t (их было бы ij) осуществить ij опытов с фиксацией значения S (пути, пройденного телом при падении); через опытные точки в трехмерном пространстве Sgt провести поверхность, которая лучшим образом соответ-

ствовала бы опытным данным. Уравнение поверхности дало бы искомую зависимость (4.22).

Воспользуемся π -теоремой и существенно упростим задачу экспериментального определения искомой зависимости. Составим список всех переменных, входящих в задачу, выразив размерности этих переменных через основные размерности:

$$\begin{aligned} S &\doteq L; \\ g &\doteq LT^{-2}; \\ t &\doteq T. \end{aligned} \tag{4.23}$$

В нашем случае $n = 2$. По π -теореме k – это число независимых размерностей, входящих в задачу. Согласно π -теореме функция имеет вид $\pi = c$, где π – безразмерная величина, составленная из S, g, t . Значение π можно получить, составив отношение S/gt^2 . Итак, искомая функция (4.22) в безразмерных величинах имеет вид $S/gt^2 = c$. Или $S = cgt^2$. Достаточно всего лишь одного опыта, в котором были бы зарегистрированы S, g, t , чтобы по полученной формуле можно было определить $S/gt^2 = c$ и получить искомый, но приближенный (так как в опытах $c \approx 1/2$) результат.

Рассмотрим пример из практики кузнечно-штамповочного производства [13]. Молот преобразует потенциальную энергию E массы падающих частей Q с высоты H в кинетическую энергию, которая расходуется на пластическую деформацию Δh обрабатываемого тела (рис. 4.7).

Важно правильно выбрать характеристики молота (Q и H), обеспечивающие его предназначение. Искомая потенциальная энергия $E = QH$ будет зависеть от размеров обрабатываемого тела (их представим обобщенно как объем поковки V), деформации Δh , сопротивления пластической деформации σ_s материала поковки (предела текучести при одноосном растяжении), массовой плотности ρ :

$$E = f(V, \Delta h, \sigma_s, \rho). \tag{4.24}$$

Выразим размерности перечисленных переменных через основные размерности.

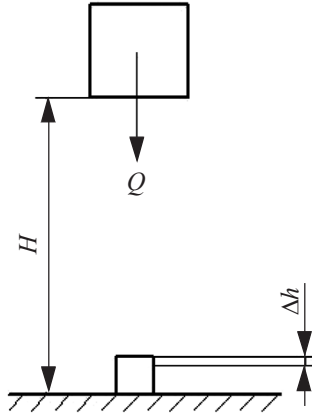


Рис. 4.7. Схема к задачековки на молоте

$$\begin{aligned}
 E &\doteq ML^2T^{-2}; \\
 V &\doteq L^3; \\
 \Delta h &\doteq L; \\
 \sigma_s &\doteq ML^2T^{-2}; \\
 \rho &\doteq ML^{-3}.
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Из четырех аргументов три – V , Δh , σ_s и ρ имеют независимые размерности: $\Delta h \doteq L$; $\sigma_s \doteq ML^2T^{-2}$; $\rho \doteq ML^{-3}$. Чтобы убедиться в этом, предположим, что эти размерности зависимые. Это означает, что из двух размерностей, возводя их в степени $a \neq 0$ и $b \neq 0$ соответственно и умножая результаты, получим размерность

$$L \doteq (ML^{-1}T^{-2})^a (ML^{-3})^b \text{ или } L \doteq L^{-a-3b} M^{a+b} T^{-2a}. \tag{4.26}$$

Приравняв показатели степени правой и левой частей: $1 = -a - 3b$; $0 = a + b$; $0 = -2a$. Решения последней системы не существует, следовательно, степенной одночлен (4.26), свидетельствующий о зависимости размерностей Δh , σ_s и ρ , составить нельзя. Размерности этих величин независимые, что свидетельствует о возможности их выбора в качестве повторяющихся переменных.

На следующем этапе будем комбинировать оставшиеся переменные с повторяющимися, чтобы получить π -члены.

Первая π -переменная будет равна:

$$\pi_1 = \frac{V}{\Delta h^{a_1} \sigma_s^{b_1} \rho^{c_1}} \quad (4.27)$$

или, если выразить переменные через основные размерности и учесть то, что π -члены должны быть безразмерны, получим:

$$\frac{L^3}{(L)^{a_1} (ML^{-1}T^{-2})^{b_1} (ML^{-3})^{c_1}} = L^0 M^0 T^0. \quad (4.28)$$

Показатели степени у соответствующих основных размерностей в каждой части уравнения должны быть равными, и поэтому

$$\text{для } L \quad 3 - a_1 + b_1 + 3c_1 = 0;$$

$$\text{для } M \quad -b_1 - c_1 = 0;$$

$$\text{для } T \quad 2b_1 = 0.$$

Решая систему уравнений, получим: $a_1 = 3$; $b_1 = 0$; $c_1 = 0$, следовательно,

$$\pi_1 = \frac{V}{\Delta h^3}. \quad (4.29)$$

Далее повторим процесс со второй оставшейся переменной:

$$\pi_2 = \frac{E}{\Delta h^{a_2} \sigma_s^{b_2} \rho^{c_2}}; \quad (4.30)$$

$$\text{для } L \quad 2 - a_2 + b_2 + 3c_2 = 0;$$

$$\text{для } M \quad 1 - b_2 - c_2 = 0;$$

$$\text{для } T \quad -2 + 2b_2 = 0.$$

Решая систему уравнений, получим: $a_2 = 3$; $b_2 = 1$; $c_2 = 3$, следовательно,

$$\pi_2 = \frac{E}{\Delta h^3 \sigma_s}. \quad (4.31)$$

Согласно π -теореме зависимость (4.24) можно представить так:

$$\pi_2 = f(\pi_1), \text{ т. е. } \frac{E}{\Delta h^3 \sigma_s} = f\left(\frac{V}{\Delta h^3}\right). \quad (4.32)$$

Или, другими словами, величины Q и H связаны с условием кочки зависимостью

$$QH = f(V/\Delta h^3) \sigma_s \Delta h^3. \quad (4.33)$$

Задача экспериментального определения функции f одной независимой переменной (4.33) значительно проще, чем функции четырех аргументов.

Рассмотрим задачу падения давления на единицу длины в гладкой трубе, по которой течет вязкая несжимаемая жидкость, как показано на рис. 4.8 [14].

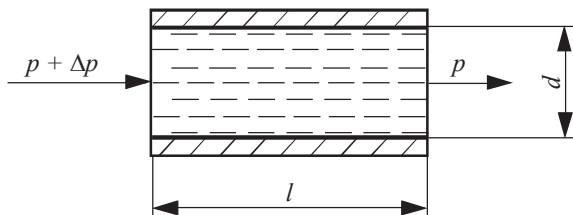


Рис. 4.8. Схема к задаче падения давления на единицу длины в гладкой трубе

Переменные определены на основе экспериментальных данных для этой задачи. Предполагается, что падение давления — функция четырех переменных:

$$\Delta p = f(d, \mu, \rho, V). \quad (4.34)$$

Составим список всех переменных, входящих в задачу, выразив размерности этих переменных через основные размерности:

$\Delta p \doteq ML^{-2}T^{-2}$ — падение давления на единицу длины трубы;

$d \doteq L$ — диаметр трубы;

$\mu \doteq ML^{-1}T^{-1}$ — вязкость жидкости;

$\rho \doteq ML^{-3}$ – плотность жидкости;

$V = LT^{-1}$ – скорость течения жидкости.

Так как в данной задаче число основных размерностей равно трем, то необходимо иметь три повторяющихся переменных. Нами выбраны переменные ρ , d , V . Повторяющиеся переменные комбинируют с одной из оставшихся переменных.

Таким образом, первая π -переменная будет равна:

$$\pi_1 = \frac{\Delta\rho}{\rho^{a_1} d^{b_1} V^{c_1}} \quad (4.35)$$

или, если выразить переменные через основные размерности и учесть то, что π -члены должны быть безразмерны, получим:

$$\frac{ML^{-2}T^{-2}}{(ML^{-3})^{a_1} (L)^{b_1} (LT^{-1})^{c_1}} = M^0 L^0 T^0. \quad (4.36)$$

Показатели степени у соответствующих основных размерностей в каждой части уравнения должны быть равными, и поэтому

$$\text{для } L \quad -2 + 3a_1 - b_1 - c_1 = 0;$$

$$\text{для } M \quad 1 - a_1 = 0;$$

$$\text{для } T \quad -2 + c_1 = 0.$$

Решая систему уравнений, получим: $a_1 = 1$; $b_1 = -1$; $c_1 = 2$, следовательно,

$$\pi_1 = \frac{d\Delta p}{\rho V}. \quad (4.37)$$

Далее повторим процесс со второй оставшейся переменной:

$$\frac{ML^{-1}T^{-1}}{(ML^{-3})^{a_2} (L)^{b_2} (LT^{-1})^{c_2}} = M^0 L^0 T^0. \quad (4.38)$$

Составляем систему линейных уравнений, из решения которой определим показатели степеней a_2 , b_2 , c_2 :

$$\text{для } L \quad -1 + 3a_2 - b_2 - c_2 = 0;$$

$$\text{для } M \quad 1 - a_2 = 0;$$

$$\text{для } T \quad -1 + c_2 = 0.$$

Решая систему уравнений, получим: $a_1 = 1$; $b_1 = 1$; $c_1 = 1$, следовательно,

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho d V}. \quad (4.39)$$

Согласно π -теореме для этой задачи должно быть два π -члена, так как имеются пять переменных и три основные размерности. Безразмерные переменные π_1 и π_2 , которые были определены, представляют требуемый набор и свидетельствуют, что эту задачу можно исследовать, пользуясь новыми переменными

$$\frac{d\Delta p}{\rho V} = \varphi\left(\frac{\mu}{\rho V d}\right) \quad (4.40)$$

или, иначе,

$$\frac{d\Delta p}{\rho V} = \varphi_1\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right), \quad (4.41)$$

где безразмерная переменная в правой части уравнения известна как число Рейнольдса.

Альтернативная процедура определения π -переменных. Зная, что π -переменные всегда состоят из произведений переменных, возведенных в соответствующие степени, можно предложить другой способ определения π -переменных. Если в данной задаче содержится k -переменных u_1, u_2, \dots, u_k , то любой π -член имеет вид $u_1^{x_1}, u_2^{x_2}, u_k^{x_k}$, где величины x_1, x_2, \dots, x_k выбирают так, чтобы их сочетание было безразмерным. Кроме того, каждая из переменных может быть выражена через их основные размерности в виде

$$u_i = M^{a_i} L^{b_i} T^{c_i}, \quad (4.42)$$

где a_i, b_i, c_i известны для любой переменной.

Таким образом, размерности для любой π -переменной можно выразить следующим образом:

$$(M^{a_1} L^{b_1} T^{c_1})^{x_1} (M^{a_2} L^{b_2} T^{c_2})^{x_2} \dots (M^{a_k} L^{b_k} T^{c_k})^{x_k}. \quad (4.43)$$

Для получения безразмерных произведений степени x_i ($i = 1, 2, \dots, k$) должны выбираться такими, чтобы исключить зависимость произведения от каждой основной размерности. Например, для исключения M, L, T требуется выполнение соответственно соотношений:

$$\begin{aligned} a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k &= 0; \\ b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k &= 0; \\ c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_k x_k &= 0. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Таким образом, произведение будет безразмерным, если эти соотношения удовлетворяются одновременно.

Уравнений будет столько же, сколько основных размерностей, а число неизвестных x_i будет равно числу переменных.

Произвольное формирование π -переменных. Описанные методы обеспечивают поэтапный процесс, который дает точный и полный ряд π -переменных. Эти методы достаточно трудоемки, особенно для задач, включающих большое число переменных. Перечислим ограничения, накладываемые на π -переменные: безразмерность, независимость, определенность количества.

Если учитывать данные ограничения, то π -переменные можно получать посредством простого подбора без использования формальных процедур.

Рассмотрим прогиб конца консольной балки прямоугольного поперечного сечения, нагруженной сосредоточенной силой на свободном конце. Предположим, что прогиб описывается следующей функцией:

$$\delta = f(b, h, l, E, P), \quad (4.45)$$

где $\delta \doteq L$ – прогиб свободного конца; $b \doteq L$ – высота балки; $h \doteq L$ – ширина балки; $l \doteq L$ – длина балки; $E = L^{-1} T^{-2} M$ – модуль упругости; $P \doteq L T^{-2} M$ – нагрузка.

Применение π -теоремы показывает, что для описания этой задачи необходимы три π -переменные.

Пользуясь свойством безразмерности, составим произвольное количество π -переменных:

$$\pi_1 = \frac{\delta}{l}; \pi_2 = \frac{b}{l}; \pi_3 = \frac{b}{h}; \pi_4 = \frac{h}{l}; \pi_5 = \frac{P}{El^2}; \pi_6 = \frac{P}{Eb^2}; \pi_7 = \frac{P}{Ebh} \text{ и т. д.}$$

Окончательный выбор π -переменных является произвольным. Из возможного количества π -переменных выбираем три (по π -теореме) с тем условием, чтобы в данной совокупности были использованы все исходные переменные:

$$\frac{\delta}{l} = \varphi \left(\frac{h}{b}, \frac{P}{El^2} \right). \quad (4.46)$$

Хотя эта процедура эквивалентна первому методу решения задач на π -теорему, она значительно менее формализована. А путем произвольного выбора можно сравнительно легко получать π -переменные.

Вывод, который можно сделать после изложенного материала, гласит, что с помощью анализа размерностей можно упрощать задачи и выражать их через безразмерные переменные. Применение анализа размерностей обеспечивает три основных преимущества:

1. Всегда сокращается рассматриваемое число переменных.
2. Новые безразмерные переменные дают возможность проводить эксперименты более экономично и эффективно.
3. Соотношения, выведенные на основе безразмерных переменных, являются общими и не ограничены какими-либо отдельными системами единиц.

4.5.6. Правила проектирования моделей

Теория моделирования легко формулируется на основе анализа размерностей. Любая техническая задача описывается рядом безразмерных π -переменных:

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n). \quad (4.47)$$

При записи этого соотношения необходимо знать основную природу физического явления и характеризующие его переменные.

Для анализа размерностей не нужны конкретные значения переменных, размеры деталей, типы материалов и т. п. Поэтому уравнение (4.47) применяется к любой системе, которая определяется теми же переменными. Если уравнение (4.47) описывает поведение некоторой конкретной натуры, можно записать подобное уравнение для модели этой натурной конструкции в виде

$$\pi_{1m} = \varphi(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm}), \quad (4.48)$$

где вид функции φ останется прежним, поскольку и в натуре и в модели происходят одинаковые процессы. Можно сформировать π -переменные таким образом, чтобы π_1 содержало переменную, которую необходимо определить по данным измерений на модели. Поэтому если модель была спроектирована и нагружена таким образом, что выполняются следующие условия:

$$\pi_{2m} = \pi_2, \pi_{3m} = \pi_3, \dots, \pi_{nm} = \pi_n, \quad (4.49)$$

то при допущении одинакового вида функции φ для модели и натуры получается

$$\pi_1 = \pi_{1m}. \quad (4.50)$$

Уравнение (4.50) – искомое уравнение моделирования, которое показывает, что найденная по данным измерений на модели величина π_{1m} будет равна соответствующей величине для натуры, поскольку все другие π -переменные для модели и натуры одинаковы. Определяемые соотношениями (4.49) правила проектирования моделей называются также условиями подобия или законами моделирования.

В качестве примера применения этой процедуры рассмотрим задачу изгиба консольной балки, которую мы уже рассматривали. Анализ размерностей этой задачи показал, что она включает три π -переменные:

$$\frac{\delta}{l} = \varphi\left(\frac{h}{b}, \frac{P}{El^2}\right). \quad (4.51)$$

Так как это уравнение справедливо как для натуры, так и для модели, предполагается, что оно относится к натуре, а подобное ему уравнение

$$\frac{\delta_m}{l_m} = \Phi_m \left(\frac{h_m}{b_m}, \frac{P_m}{E_m l_m^2} \right) \quad (4.52)$$

относится к модели. Поэтому условия проектирования имеют вид:

$$\frac{h_m}{b_m} = \frac{h}{b}, \quad \frac{P_m}{E_m l_m^2} = \frac{P}{E l^2}. \quad (4.53)$$

Учитывая, что $l = l_m m$, $h = h_m m$, $b = b_m m$, можем определить необходимую нагрузку модели:

$$P_m = \frac{E_m P}{E m^2}. \quad (4.54)$$

Следует отметить, что такое проектирование модели требует не только определения геометрического масштаба, но и точного определения масштаба нагрузки. Это характерный результат для большинства случаев проектирования моделей.

В рассматриваемой задаче использовались переменные, характеризующие ее поперечное сечение, – ширина b и толщина h . Однако если предполагается, что существен только прогиб балки в результате изгиба, то переменной для характеристики поперечного сечения будет момент инерции I , которым можно пользоваться вместо ширины и толщины. Таким образом, соответствующее условие моделирования примет вид:

$$I_m = I/m^4. \quad (4.55)$$

Это условие обеспечивает гораздо большее разнообразие выбора геометрии модели и позволяет смоделировать элементы конструкции с более сложными поперечными сечениями посредством более простых геометрических форм модели (таких как прямоугольник). Хотя модель, спроектированная на этой основе, пригодна для определения прогиба, она может быть неприемлемой для опре-

деления других величин, таких как изгибные напряжения, которые зависят от высоты поперечного сечения и от момента инерции. Модели, которые пригодны для определения отдельных переменных или класса переменных, но которые нельзя использовать для определения других величин, будем называть адекватными моделями в отличие от более общего класса точных моделей. Точные модели обязательно должны быть геометрически подобны натуре, в то время как для адекватных моделей это условие не является обязательным. Однако адекватные модели полезны, и на ранних стадиях проектирования моделей следует уделять серьезное внимание возможности упрощения проектирования посредством продуманного сочетания переменных и исключения тех из них, которые не влияют существенно на исследуемое явление.

Особенно сложные математические образы используются в качестве моделей в теоретической физике, где исследователь сталкивается со столь сложными физическими явлениями, что образы повседневного мышления и «здравый смысл» оказываются непригодными для их понимания. В технических науках обычно математические модели проще, тем не менее математическая культура исследователя, работающего в технических науках, должна быть достаточно высокой, причем ориентированной не столько на решения математических задач, сколько на их постановку (формулирование). Решение математической задачи, вытекающей из принятия соответствующей модели, можно переложить и на математика, правильную же постановку такой задачи (выбор адекватной модели) может сделать только специалист в конкретной прикладной (технической) области. В отличие от современной физики, в прикладных науках практический опыт и «здравый смысл» имеют преобладающее значение. Чрезмерное увлечение математической стороной вопроса в прикладных науках обычно воспринимается как недостаток исследователя. Характерно в этом отношении ироническое высказывание известного математика Г. Штейнгауза: «Из дома реальности легко забрести в лес математики, но лишь немногие находят дорогу назад» [11, с. 47].

Рассматривая математические модели, необходимо сказать о моделировании вообще как об инструменте научного исследования. Моделирование, т. е. изучение объекта по его мысленному или предметному аналогу (модели), является в настоящее время основным средством исследования в большинстве наук. При этом понятие «модель» трактуется неодинаково в различных науках, и единой классификации моделей пока не выработано. Философы ведут дискуссии на эту тему. Специалисту, работающему в прикладных (особенно технических) науках, нет необходимости разбираться в столь специальных философских вопросах. Достаточно знать, что модели могут быть мысленными (в том числе математическими) или предметными, т. е. физическими устройствами. Первые относятся к теоретическим исследованиям, вторые – к экспериментальным. Если мысленные модели описываются словесно (вербальные модели), их возможности весьма ограничены. Они могут служить лишь исходным материалом для логического анализа, исключающего какие-либо количественные результаты.

В случае же использования математических образов эффективность моделирования многократно возрастает. Возникает возможность количественных оценок изучаемых объектов, в том числе выявления количественных закономерностей, прогнозирования развития изучаемых процессов и т. д. По этим причинам любая мысленная модель, не являющаяся математической, обычно рассматривается в технических науках как начальный (промежуточный) этап исследований, предполагающий последующую математизацию принятых представлений, т. е. формирование математической модели.

После принятия математической модели дальнейшие исследования ведутся на этой модели, как правило, математическими методами, а получаемые результаты проверяются экспериментально. Если результаты, получаемые с помощью принятой модели, в той или иной мере подтверждаются экспериментами, модель подвергается необходимой корректировке и используется в последующих исследованиях. Если же результаты совершенно не согласуются

с экспериментами, принимается новая модель и исследования проводятся с этой (новой) моделью. Проверка принятой математической модели в ряде случаев представляет довольно сложную задачу, требующую хорошо продуманной методики эксперимента, использования различных методов статистического анализа экспериментальных данных.

Так как математическая модель однозначно не вытекает из описания задачи, исследователю необходимо критически относиться к любой модели, объективно сравнивая с экспериментальными данными теоретические результаты, получаемые при различных моделях, и выбирая наилучшую (наиболее адекватную действительности) модель. Мастерство исследователя-теоретика определяется искусством строить эффективные (адекватные) математические модели, умением их использовать и корректировать. Это обычно требует нестандартного мышления и достаточно высокой математической культуры.

В настоящее время в технических науках превалируют математические модели в виде алгоритмов, реализуемых с помощью компьютерных программ. При этом аналитические методы решения все больше вытесняются численными методами. Если еще в 50–60-х гг. XX в. в теоретических работах превалировали дифференциальные уравнения, то после 90-х гг. почти все теоретические вопросы решаются численными методами с помощью компьютерных программ. Это связано с двумя причинами. Во-первых, практически во всех технических науках задачи, относительно легко поддающиеся аналитическим решениям, в основном уже решены, а современные технические задачи обычно связаны со сложными, часто еще нерешенными математическими проблемами (например, с решением различных дифференциальных уравнений, некоторыми операциями со случайными величинами и т. д.). Во-вторых, исключительно быстрое развитие компьютерной техники сделало численные методы настолько удобными, что старым аналитическим методам с ними стало почти невозможно конкурировать.

4.5.7. Основы физического моделирования

Использование физических моделей для исследования машин, механизмов, деталей и других объектов основано на теории подобия [24]. Эта теория дает правила переноса экспериментальных данных, полученных при исследовании физической модели на натурный объект. Теория подобия, следовательно, изучает условия подобия физических явлений. Два явления называются подобными, если все количественные характеристики одного из них получаются из соответствующих количественных характеристик другого путем умножения их на постоянные числа (константы подобия), одинаковые для всех однородных величин.

Согласно теории подобия два явления подобны только в том случае, если они качественно одинаковы и характеризуются равными значениями некоторых безразмерных параметров (так называемых определяющих критериев подобия), составленных из физических и геометрических величин, характеризующих эти явления.

Теория подобия является научной базой постановки экспериментов и обработки их результатов, она лежит в основе моделирования.

Самым простым является геометрическое подобие: две геометрические фигуры подобны, если отношения всех соответственных длин одинаковы. При этом если одна фигура является моделью, а другая – натурой, то простым умножением размеров модели на величину масштаба получают размеры природы. Здесь масштаб является коэффициентом, критерием подобия. Более сложным является физическое подобие, которое представляет собой обобщение геометрического подобия. Как уже указывалось, два физических явления подобны, если по известным характеристикам одного (модели) можно получить характеристики другого (натуры) простым пересчетом. При физическом подобии требуется пересчет не только геометрических размеров, но и более сложных характеристик, например, силы, напряжения, деформации, жесткости, работы и т. п. Поэтому здесь пересчет производится по более сложным правилам, которые и даются в теории подобия.

Моделирование начинается с аналитического описания изучаемого объекта. На этом первом этапе исследователь может столкнуться с двумя случаями:

- аналитическое описание объекта известно, оно имеется в виде уравнения или системы уравнений, описывающих объект, т. е. есть предварительная информация об объекте;
- аналитическое описание неизвестно, отсутствует предварительная информация об изучаемом объекте.

Естественно, в первом случае задача моделирования упрощается. Во втором случае задача моделирования значительно сложнее, но она тоже может быть решена. Для ее решения используют так называемый метод анализа размерностей, который мы рассмотрим позднее.

Здесь же рассмотрим первый случай физического моделирования, когда об изучаемом объекте есть предварительная информация, т. е. известно его аналитическое описание в виде уравнения или системы уравнений.

В этом случае моделирование осуществляется по следующей схеме:

1. Выписывается уравнение или система уравнений, описывающих изучаемый объект.
2. Выписанные уравнения преобразуются и приводятся к безразмерному виду.
3. Определяются критерии подобия.
4. Выводятся формулы, с помощью которых результаты модельного эксперимента можно пересчитать на натурный объект.

После этого можно приступить к выполнению эксперимента на физической модели.

По указанной схеме получают для различных условий законы подобия и используют их при экспериментальном исследовании. Например, при модельном исследовании процесса осадки выполняют основной закон подобия, который требует, чтобы напряженно-деформированное состояние в сходственных точках модели (осаживаемый образец в лабораторных бойках) и природы (осаживаемый образец в природных условиях)

ваемая заготовка на натурном прессе) было одинаково. Для этого необходимо, чтобы модель и натура были геометрически подобны и коэффициенты трения на контактных поверхностях у модели и натуры были одинаковы.

Такой закон подобия дает возможность по результатам замера механических величин на модели определить механические величины на натуре.

Предположим, что начало координат для подобных фигур будет размещаться в сходственных точках, а направления осей будут совпадать с направлениями сходственных отрезков. На рис. 4.9 показаны две подобные фигуры. Точки O_1 и O_2 – сходственные, через них проходят оси выбранной системы декартовых координат.

Пластически деформируемые тела называют подобными, если они геометрически подобны в любой сходственный момент времени и безразмерные механические переменные одинаковы.

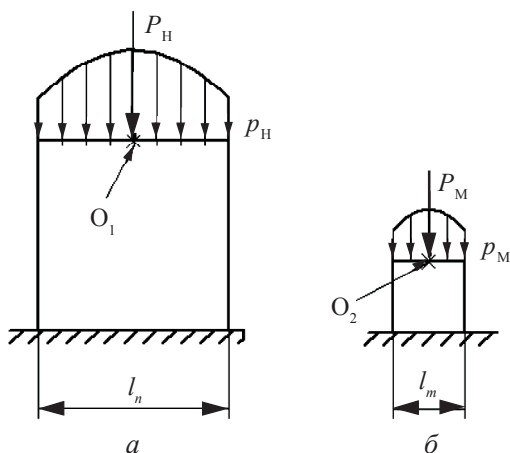


Рис. 4.9. Схема осадки натурального образца (а) и модели (б)

Рассмотрим необходимое условие подобия двух пластически деформируемых тел – натуры и модели. Если они подобны, то безразмерные переменные одинаковы во всех сходственных точках с координатами \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} и в любой сходственный момент времени \bar{t} .

Так, при процессе осадки в плоских бойках удельные давления на инструмент, выраженные в безразмерном виде, на модели и натуре должны быть одинаковы, т. е. $p_M = p_H$ или $\frac{p_M}{2\tau_{SM}} = \frac{p_H}{2\tau_{SH}}$.

Значит, удельные давления на инструмент модели и натуре относятся друг к другу как пределы текучести модели и натуре:

$$\frac{p_M}{p_H} = \frac{\tau_{SM}}{\tau_{SH}}. \quad (4.56)$$

Это означает также, что модель и натура будут иметь одинаковые относительные деформации.

Силы осадки на модели и натуре соответственно равны:

$$P_M = F_M p_{CP.M}; \quad P_H = F_H p_{CP.H}, \quad (4.57)$$

где F_M и F_H – площади сходственных поверхностей.

Так как $\frac{p_{CP.M}}{2\tau_{SM}} = \frac{p_{CP.H}}{2\tau_{SH}}$; $\frac{p_{CP.M}}{p_{CP.H}} = \frac{\tau_{SM}}{\tau_{SH}}$, то, подставляя соотношения для сил осадки на модели и натуре, выраженные через площади, получим:

$$\frac{P_M}{P_H} = \frac{F_M p_{CP.M}}{F_H p_{CP.H}} \quad (4.58)$$

или, учитывая то, что при геометрическом подобии имеет место равенство

$$\frac{F_M}{F_H} = \frac{1}{m^2}, \quad (4.59)$$

получим:

$$\frac{P_M}{P_H} = \frac{\tau_{SM}}{m^2 \tau_{SH}}. \quad (4.60)$$

Мощности осадки на модели и натуре будут соответственно равны:

$$N_M = P_M V_M; \quad N_H = P_H V_H. \quad (4.61)$$

Отношение мощностей будет равно:

$$\frac{N_M}{N_H} = \frac{P_M V_M}{P_H V_H} \quad (4.62)$$

или

$$\frac{N_M}{N_H} = \frac{\tau_{SM} V_M}{m^2 \tau_{SH} V_H}. \quad (4.63)$$

Для того, чтобы тела модели и натуры в процессе осадки оставались подобными, необходимо соотношение скоростей бойков модели и натуры иметь равным:

$$\frac{V_M}{V_H} = \frac{1}{m}. \quad (4.64)$$

Подставив последнее соотношение в (4.63), получим:

$$\frac{N_M}{N_H} = \frac{\tau_{SM}}{m^3 \tau_{SH}}. \quad (4.65)$$

Из полученных соотношений следует, что если мы на модели определяли величины параметров процесса осадки: p_H , P_M и N_M , то эти параметры на натурном процессе будут равны:

$$p_H = p_M \frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}}; \quad P_H = P_M \frac{m^2 \tau_{SH}}{\tau_{SM}}; \quad N_H = N_M \frac{m^3 \tau_{SH}}{\tau_{SM}}. \quad (4.66)$$

Если на модели осаживался образец из того же материала, что и натурная заготовка, то $\frac{\tau_{SH}}{\tau_{SM}} = 1$ и формулы пересчета будут иметь вид:

$$p_H = p_M; \quad P_H = P_M m^2; \quad N_H = N_M m^3. \quad (4.67)$$

Таким образом, получили, что удельное давление на инструмент в натуре будет таким же, как в модели, сила осадки в натуре будет в m^2 раз больше и мощность осадки в m^3 раз больше, чем в модели.

Приведенные формулы известны под названием **з а к о н а**
п о д о б и я при деформировании геометрически подобных тел.

Теория подобия и описывающий его закон позволяют решать задачи моделирования и в более сложных случаях, чем рассмотренный случай осадки.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Общие сведения

Экспериментальные исследования представляют собой часть НИР, в которой путем измерений или наблюдений выявляются конкретные факты, подтверждающие или опровергающие теоретические представления, или выявляются новые зависимости, ранее теоретически не изучавшиеся. Эксперимент во всех науках принято считать критерием достоверности любых выдвигаемых предположений. Тем не менее результаты конкретного эксперимента всегда отражают не только изучаемое явление, но и точность использованных измерительных приборов, эффективность принятой методики эксперимента, влияние различных помех (неучтенных внешних факторов) и даже человеческий фактор – ошибки испытателя, способного по невнимательности неправильно записать какой-либо результат измерения. По этим причинам многие столетия существуют неписанные правила выполнения экспериментальных исследований, состоящие в следующем:

1) никогда не следует доверять единичному результату опыта, всегда необходимо повторять выполненный опыт неоднократно и все выводы делать на основе усредненных результатов многократных проводимых опытов;

2) следует быть исключительно осторожным при отбраковке результатов экспериментов, несмотря на существование в этой сфере многочисленных рекомендаций формально-математического характера (правило «трех сигм» и т. д.); как показывает история науки, принципиально новые факты и закономерности очень часто первоначально принимались за ошибки, что на многие годы задерживало решение проблемы.

Классификации экспериментов. Существует множество классификаций экспериментов по тем или иным признакам.

В зависимости от возможности управления ходом эксперимента выделяют два вида экспериментов:

1) пассивный эксперимент, при котором экспериментатор выступает в роли наблюдателя, не имеющего возможности влиять на ход эксперимента, на условия его проведения;

2) активный эксперимент, при котором ход испытания, все проводимые измерения выполняются по заранее разработанной программе, а условия эксперимента, его методика, а также внешние факторы, воздействующие на объект изучения, могут меняться по воле экспериментатора.

Примерами пассивного эксперимента могут служить любые астрономические наблюдения, ибо астрономы не имеют никаких возможностей воздействия на изучаемые звезды, планеты, астероиды (по крайней мере, при современном уровне развития цивилизации). Изучение особенностей грузового потока на магистральной дорожной трассе путем регистрации числа проезжающих машин (на выбранном участке дороги) за единицу времени, социологические исследования путем опроса большого числа людей – также пассивные эксперименты и т. д. Во многих науках синонимом термина «пассивный эксперимент» является наблюдение, хотя под «наблюдением» иногда понимают пассивный эксперимент без количественных оценок (без измерений).

Примерами активного эксперимента могут служить любые испытания конструкций или машин, когда условия испытания заранее продумываются, порядок проведения испытания устанавливается в соответствии с замыслом экспериментатора. При этом программа такого эксперимента может оставаться управляемой во время его проведения, т. е. не исключается возможность корректировки принятой методики в ходе испытаний. При механических испытаниях выбираются места приложения нагрузок, величины ступеней нагружения, скорости нагружения и т. д. В настоящее время активный эксперимент является основным методом экспериментальных исследований (по крайней мере, в естествознании и технических науках).

В зависимости от условий экспериментирования и способа представления изучаемого объекта выделяют три вида экспериментов:

- 1) лабораторные;
- 2) натурные;
- 3) производственные.

Лабораторные эксперименты проводятся в лабораторных условиях и предполагают использование как стандартных приборов, посуды, приспособлений, так и специальных моделирующих устройств, установок, стендов и т. п. Такие эксперименты позволяют целенаправленно, с требуемой повторностью изучать влияние различных факторов в любом их сочетании, с минимальными затратами времени и ресурсов. Тем не менее во многих науках в лаборатории не удастся точно воссоздавать условия, при которых функционирует реальный объект. В частности, в технических науках лабораторные результаты принимаются без корректировки лишь при проведении стандартных испытаний (определение удельного веса, влажности, прочности и т. д.) или при идентификации отдельных объектов. В случае же изучения поведения сложных объектов (конструкций, механизмов и т. д.), при выявлении новых закономерностей получаемые результаты рассматриваются лишь как приближенные. Это связано с тем, что в лаборатории приходится использовать не натурные объекты, а их аналоги (предметные модели), поведение которых не тождественно натурным объектам.

В отличие от используемых в теоретических исследованиях математических моделей, являющихся мысленными образами, модели в экспериментальных исследованиях являются физическими устройствами. Параметры таких устройств выбираются по специальным правилам, которые задаются экспериментатором.

Естественно, что экспериментатор всегда стремится свести к минимуму различие между поведением лабораторного и натурального объектов исследований, но это сложная задача, которую не всегда удастся решать с достаточной надежностью. Сформировались самостоятельные науки, изучающие принципы «предметного моделирования», т. е. условия подобия физических явлений, – теория подобия, моделирование.

В целом в большинстве технических наук лабораторные исследования представляют лишь промежуточный этап, дающий предварительные результаты, уточняемые затем натурными экспериментами.

Натурные эксперименты особенно характерны для технических наук и предполагают изучение тех или иных объектов (конструкций или машин) в натуральном виде, т. е. такими, какими они должны эксплуатироваться (те же размеры, те же материалы и т. д.). Такие эксперименты дают очень ценную информацию, но они в десятки, сотни (а иногда даже тысячи) раз дороже лабораторных исследований, поэтому могут проводиться лишь в крайне ограниченных объемах.

Натурные испытания, проводимые с научной целью, обычно предусматривают очень большое число измерений, что связано со вполне обоснованным желанием получить максимум информации от каждого испытания. Полезно следовать старому принципу экспериментатора: «все, что можно измерить, измеряй», ибо «лишние» результаты рано или поздно потребуются (и неоднократно!) для решения других задач. Используются различные измерительные приспособления – мездозы, тензометры, на испытуемую конструкцию наклеиваются различные датчики, используется сложное электронное оборудование для регистрации показаний датчиков. Все это позволяет достигать высокой точности и полноты получаемых данных.

Производственный эксперимент обычно представляет подлежащую научному анализу деятельность производственных предприятий, внедряющих у себя ту или иную разработку (новую технику, новую технологию и т. д.). Участниками этого этапа инноваций являются в основном производственные организации, выпускающие товарную продукцию, авторы же разработок выполняют лишь научное сопровождение производственной деятельности и проводят анализ результатов. Цель производственного эксперимента – в получении окончательной оценки эффективности внедряемой разработки, т. е. в проверке на практике предложений научных работников. При этом оцениваются многие

факторы, которые часто «ускользают» при выполнении НИР: фактические затраты на реорганизацию производства, реальность получения ожидаемых результатов в условиях конкретного предприятия, фактический спрос на новую продукцию и т. д.

Наилучшие условия для производственных экспериментов возникают при наличии научно-производственных объединений, которые способны выполнить НИР и внедрить ее результаты в производство.

В зависимости от числа изучаемых факторов различают:

- 1) однофакторный эксперимент;
- 2) многофакторный эксперимент.

О д н о ф а к т о р н ы й э к с п е р и м е н т предполагает выделение одного интересующего фактора и изучение его влияния в условиях стабильности всех остальных факторов.

Путем проведения серии однофакторных экспериментов можно последовательно изучать влияние любого числа факторов, т. е. сначала изучается первый выделенный фактор, затем второй, третий и т. д. Во всех случаях должна обеспечиваться стабильность влияния остальных (побочных, т. е. не изучаемых) факторов. Очевидно, что при большом количестве факторов такой способ экспериментирования становится нерациональным.

Если не удастся обеспечить стабильность побочных факторов, ищется такая методика экспериментирования, при которой влияние побочных факторов проявлялось бы случайным образом.

М н о г о ф а к т о р н ы й э к с п е р и м е н т предполагает одновременное изучение влияния всех интересующих исследователя факторов. В этом случае варьируются все переменные и каждый эффект оценивается по результатам всех опытов, проведенных в данной серии экспериментов.

Очевидно, что такой способ экспериментирования значительно сложнее однофакторного способа. Он требует соблюдения множества правил и ограничений, применения специальных методов обработки получаемых данных и в целом предъявляет повышенные требования к методологической подготовке экспериментатора. Однако он дает значительно больше информации, чем однофак-

торный эксперимент (при тех же материальных затратах и той же продолжительности исследования). Теоретической базой такого метода экспериментирования является математическая дисциплина «планирование эксперимента» (ПЭ), основные положения которой будут рассмотрены далее.

5.1.1. Цели эксперимента

Определим цели, ради которых проводятся экспериментальные исследования. Ограничимся технологическими экспериментами, которые направлены на решение технико-экономических задач, поиск новых технологических возможностей и новых материалов. Отметим, что это очень широкий спектр деятельности, поэтому технологический эксперимент занимает ведущее место в ряду многочисленных экспериментов.

5.1.2. Описание изучаемого процесса

В технических науках процесс (объект) считается описанным, определенным, если записано уравнение или система уравнений, правильно отражающие наиболее существенные его характеристики, т. е. имеется математическая модель процесса. В большинстве экспериментальных исследований построение математической модели является начальной и обязательной стадией изучения процесса. В некоторых задачах это конечная цель, поэтому методы построения математической модели мы будем рассматривать подробно.

В общем случае математическая модель процесса записывается в виде параметрического уравнения (4.1) или алгебраического уравнения.

5.1.3. Нахождение экстремальных условий процесса

Необходимо найти такие условия протекания процесса, т. е. такой набор факторов x_1, x_2, \dots, x_k , при которых выходной параметр y принимает минимальное или максимальное (экстремальное) значение. В технологических задачах в качестве y обычно выступают технико-экономические показатели процесса (стоимость продукции, производительность, расход материала и электроэнергии,

процент брака, количество трещин и т. п.). Такая же цель ставится в распространенных в металлургии задачах «состав – свойство», в которых, варьируя химическим составом сплава, добиваются его наилучших свойств. Основой таких экспериментов является математическая модель (4.1).

5.1.4. Ранжирование переменных

Среди входных переменных (факторов) x_1, x_2, \dots, x_k есть сильно-но влияющие на параметр y , и с ними, по-видимому, следует считаться в первую очередь. Это значимые параметры. Малозначимые входные параметры, изменение которых мало отражается на величине y , наоборот, следует исключить из уравнения (4.1), чтобы упростить исследование.

Для технико-экономических и производственно-технологических задач существует теорема, известная как закон Парето и утверждающая, что значимых параметров в экономических и технологических задачах немного. Точнее, в исследовании выгодно выбрать только некоторые из них и стабилизировать значения других значимых параметров. Например, когда изучают какой-нибудь параметр качества выпускаемых заводом деталей, то в каждом конкретном случае выделяют не более трех-четырех наиболее важных причин брака продукции. Остальные параметры либо слабо влияют на процесс (в нашем случае на процент бракованных деталей), либо пока не заслуживают внимания и в исследовании устанавливаются на каком-либо постоянном уровне.

В любом процессе все факторы можно ранжировать по степени их влияния. Когда проводится эксперимент, то его сложность и стоимость сильно зависят от количества входных параметров, поэтому очень важно выделить наиболее значимые факторы и исключить из анализа остальные.

Но, с другой стороны, в теории информатики имеет место теорема о существенных параметрах, утверждающая, что при пропуске какого-нибудь существенного входного параметра результат эксперимента может быть неверным и, возможно, прямо противоположным. Очень опасно не учитывать существенные параметры.

В сложных процессах часто трудно сразу определить, какие факторы существенны. По-видимому, разумно вначале включить в уравнение (4.1) как можно большее количество параметров, в том числе сомнительных, в надежде на то, что малозначимые процессы исследования отсеются. Для отсеивания проводится специально спланированный эксперимент и применяется соответствующий математический аппарат для его обработки (дисперсионный анализ).

5.1.5. Имитация реального процесса

Когда имеется достоверная математическая модель процесса, то появляются широкие возможности по его имитации. Можно, не решая сложные уравнения, организовать игру с ними, т. е. проследить поведение выходного параметра при изменении входных. Обычно такие игры осуществляются на персональных ЭВМ и позволяют выявить различные свойства изучаемого объекта. Например, можно проследить изменение некоторых параметров во времени и спрогнозировать развитие процесса на будущее. При этом можно установить нежелательные тенденции его развития, предотвратить аварию, предусмотреть дополнительные меры для улучшения процесса и т. п. В другом случае, наоборот, устанавливают узкие пределы изменения входных параметров, которые необходимо автоматически поддерживать с целью стабилизации технологического процесса и достижения наивысшего качества продукции. Имитационные модели широко применяются для вычисления и прогнозирования свойств готового продукта, корректировки технологического процесса и т. п.

5.1.6. Типы эксперимента

Как отмечено выше, различают два типа экспериментов: пассивный и активный. П а с с и в н ы е э к с п е р и м е н т ы проводятся по двум схемам. Первая схема характеризует полную пассивность экспериментатора при назначении входных параметров процесса. Как правило, такие эксперименты проводятся на промышленной установке, на которой процесс отлажен, все параметры процесса установлены на оптимальных или рабочих значениях и изменять их в широких пределах нельзя. Экспериментатор лишь

фиксирует наблюдения, измеряя входные и выходные параметры через определенные промежутки времени, и никак не воздействует на ход процесса. Выводы, получаемые в таких экспериментах, относятся только к наблюдаемому диапазону изменения рабочих параметров и редко позволяют выйти за этот диапазон.

Такого недостатка лишен пассивный эксперимент, проводимый по второй схеме. Возможно, его не следовало бы называть пассивным, так как действия экспериментатора здесь весьма активны. Лучше называть его лабораторным экспериментом в отличие от рассмотренного выше промышленного. В лабораторном эксперименте все входные параметры изменяются в самых широких пределах, а поведение объекта исследуется не только при рабочих, но и при любых возможных, даже запредельных значениях параметров. Обычно такой эксперимент проводится следующим образом. Все факторы, кроме x_i , фиксируются на заданных постоянных значениях, а изменяется в широком диапазоне значений только один параметр x_i . Получается зависимость

$$y = f(x_i) \quad (5.1)$$

или серия зависимостей при разных наборах значений фиксированных параметров. Затем строятся точно такие же зависимости от других параметров. Полученные графики наглядны, содержательны и достоверны.

Однако такие эксперименты имеют много недостатков. Прежде всего, они дороги: опыты проводятся в большом количестве точек, расходуется много материала на изготовление образцов, затрачивается много времени на измерения и пр. Кроме того, графическое представление информации иногда недостаточно, необходима математическая формула, т. е. математическая модель, без которой, как указывалось ранее, невозможно имитационное моделирование или автоматизированное управление объектом, а также поиск экстремальных условий и многое другое. Получить формулу по графикам несложно, хотя возможны практические трудности. Одна из них связана с тем, что по графикам трудно количественно оценить эффекты взаимодействия параметров. Поясним это на примере.

Пусть проводится эксперимент только с двумя входными параметрами x_1 и x_2 . По первой серии опытов построены графики зависимостей $y = f(x_1)$ при нескольких постоянных значениях параметра x_2 . Вторая серия опытов позволила построить семейство графиков $y = f(x_2)$ при фиксированных значениях параметра x_1 (рис. 5.1).

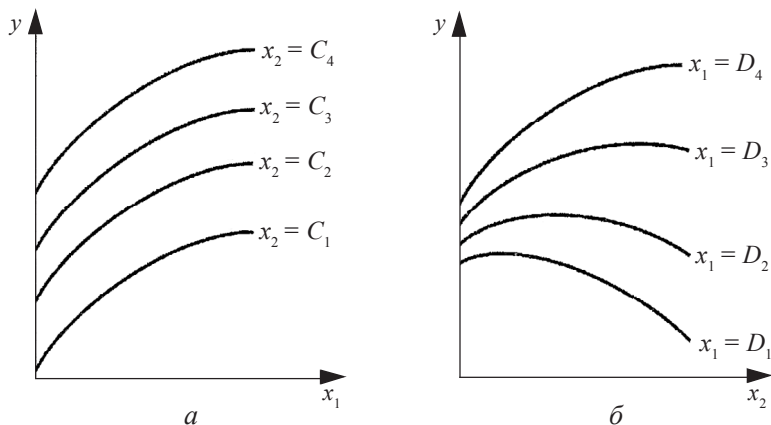


Рис. 5.1. Экспериментальные кривые при отсутствии (а) и наличии (б) взаимодействия между факторами

Если кривые параллельны (см. рис. 5.1, а), то их можно записать в виде уравнения

$$y = A + f(x_1) + f(x_2), \quad (5.2)$$

где A – некоторая константа.

Каждая из функций $f(x_1)$ и $f(x_2)$ зависит только от одной переменной. Поэтому факторы x_1 и x_2 независимо друг от друга воздействуют на величину y и называются независимыми, а уравнения типа (5.2) – сепарабельными. На графиках сепарабельные функции изображаются в виде параллельных кривых. В нашем примере на рис. 5.1, а мы имеем семейство таких кривых в функции от параметра x_1 .

Если кривые не параллельны, то семейство кривых будет описываться уравнением

$$y = A + f(x_1) + f(x_2) + f(x_1) \cdot f(x_2). \quad (5.3)$$

Для семейства прямых линий получим:

$$y = A + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (5.4)$$

Ход зависимости от одной переменной определяется значением другой переменной. Факторы x_1 и x_2 в своем воздействии на значение y зависят друг от друга, т. е. взаимодействуют. Член $f(x_1) \cdot f(x_2)$ (или для прямых линий $D \cdot x_1 \cdot x_2$) отражает степень их взаимного влияния на y , поэтому называется взаимодействующим или взаимодействием. При пассивных экспериментах взаимодействующие члены определить легко только в том случае, когда количество входных факторов невелико (например, как у нас, два). Но при большом количестве входных параметров и изобилии графиков это превращается в трудную задачу.

Заметим, что в технико-экономических задачах многие факторы не взаимодействуют, каждый из них влияет на величину y самостоятельно. По крайней мере, все входные параметры можно разбить на небольшие группы, внутри которых взаимодействие между факторами допустимо, а между группами оно отсутствует. Отсюда понятно, что, проводя эксперимент только с входными параметрами одной группы, которых не может быть много, мы не получим искаженный результат.

Ак т и в н ы й э к с п е р и м е н т не имеет недостатков пассивных экспериментов. Он заранее планируется так, чтобы с минимальными затратами получить требуемую модель процесса или иную информацию. При этом определяется экономная стратегия проведения эксперимента, в соответствии с которой вначале проводят простую серию опытов. Анализируя эту серию, делают вывод о том, достаточна ли она для достижения цели. Если нет, то планируется следующая серия опытов.

При современных дорогостоящих опытах проведение активных экспериментов становится практически обязательным. Технике проведения и обработке результатов таких экспериментов

и посвящено данное учебное пособие. Однако не следует, овладев этой техникой, совсем отказываться от проведения пассивных экспериментов. Когда опыты недороги, предпочтительна наглядная форма их представления. Тогда очень эффективен пассивный эксперимент второго вида. Он даже обладает одним преимуществом перед активным экспериментом. Активный эксперимент работает только в однородной области, когда в исследуемой области изучаемая величина y не может изменяться скачкообразно, свойства материала не меняются, ничто не ломается и точность измерения остается постоянной.

Оценить быстро изменяющиеся эффекты при переходе из одной области в другую можно только с помощью эксперимента второго рода. Например, при изучении какого-нибудь свойства сплава на границе перехода из одного фазового состояния в другое активный эксперимент неприменим. Наоборот, большое количество опытов пассивного эксперимента здесь может оказаться единственным способом описания всех нюансов, связанных с фазовым переходом. В металлографии дилатометрические кривые, характеризующие изменение длины образца при его остывании, строятся только методом пассивного эксперимента и обязательно по большому числу опытов, чтобы обнаружить точки фазовых переходов.

5.2. Модельные исследования

Физическая величина m , характеризующая объект измерений, называется измеряемой величиной. Совокупность операций, направленных на установление численного значения физической величины, составляет процесс измерения. Если при измерении используются электронные средства обработки сигнала, необходимо сначала преобразовать измеряемый параметр в эквивалентную электрическую величину, причем как можно точнее. Это значит, что полученная электрическая величина должна содержать всю информацию об измеряемом параметре.

5.2.1. Датчики

Д а т ч и к – это устройство, которое, подвергаясь воздействию физической измеряемой величины, выдает эквивалентный сигнал, обычно электрической природы (заряд, напряжение или импеданс), являющийся функцией измеряемой величины:

$$S = F(m). \quad (5.5)$$

Здесь S – выходная величина датчика, а m – входная величина. Измерив значение S , можно определить тем самым значение m .

Датчик с точки зрения вида сигнала на его выходе может быть активным – генератором, выдающим заряд, напряжение или ток, либо пассивным, с выходным сопротивлением, индуктивностью или емкостью, изменяющимся соответственно входной величине.

Различие между активными и пассивными датчиками обусловлено их эквивалентными электрическими схемами, отражающими фундаментальные отличия в природе используемых в датчиках физических явлений.

Принцип действия активного датчика основан на том или ином физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму энергии (табл. 5.1).

В пассивных датчиках некоторые параметры выходного импеданса могут меняться под воздействием измеряемой величины (табл. 5.2).

Изменения импеданса могут быть, таким образом, вызваны воздействием измеряемой величины либо на геометрию и размеры элементов датчика, либо на электрические и магнитные свойства его материала, либо, что реже, на то и другое одновременно. Геометрические размеры датчика и параметры его импеданса могут изменяться, если датчик содержит подвижный или деформирующийся элемент.

Каждому положению подвижного элемента датчика соответствует определенный импеданс, и измерение его параметров позволяет узнать положение элемента. На этом принципе работает большое число датчиков положения и перемещения объектов:

**Физические эффекты, используемые
для построения активных датчиков**

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический эффект	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический эффект Внешний фотоэффект Внутренний фотоэффект в полупроводнике с <i>p-n</i> -переходом	Заряд Ток Напряжение
Сила, давление, ускорение	Пьезоэлектрический эффект	Заряд
Скорость	Электромагнитная индукция	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

потенциометрических, индуктивных с подвижным сердечником, емкостных.

Деформация является результатом действия силы (или величины, с ней связанной, – давления, ускорения) на чувствительный элемент датчика. Изменение импеданса датчика, вызванное деформацией чувствительного элемента, вызывает изменение соответствующего электрического сигнала в специальной измерительной схеме, в которую этот датчик включают.

Чувствительность датчиков. Для электроизмерительных приборов применяются следующие определения чувствительности:

1) Отношение линейного или углового перемещения указателя к изменению значения измеряемой величины, вызвавшему это перемещение [19].

В математической форме это определение имеет следующий вид:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta X}, \quad (5.6)$$

где S – чувствительность; ΔL – изменения по шкале; ΔX – изменение измеряемой величины.

**Физические принципы преобразования величин и материалы,
используемые для построения пассивных датчиков**

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление Магнитная проницаемость	Сплавы никеля, легированный кремний Ферромагнитные сплавы
Перемещение	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

2) В тех случаях, когда в измерительной установке не содержится указателя, как это имеет место в установках, используемых для автоматического регулирования, под термином «чувствительность» может быть принято отношение изменения выходной величины элемента измерительной установки к изменению входной величины.

Такое определение обозначается так же, как и выше (см. (5.6)):

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \quad (5.7)$$

где ΔY – изменение выходной величины (линейное перемещение, сопротивление, ток и т. д.); ΔX – изменение входной величины.

3) Для сравнительной оценки два одноименных элемента схемы сопоставляют иногда по относительной чувствительности, под которой понимается отношение выходной величины к входной в относительных единицах:

$$S = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}. \quad (5.8)$$

Относительная чувствительность характеризует только сравнительные достоинства или недостатки данного элемента измерительной установки и не является однозначной с приведенным выше понятием «чувствительность».

5.2.2. Электротензометрия

Электротензометрией называют обычно измерение напряжений и деформаций с помощью электротензометров.

Электротензометры – электрические устройства, позволяющие измерять деформацию от внешних и внутренних воздействий.

К внешним воздействиям можно отнести силы, приложенные к нагружаемому объекту, а к внутренним – воздействия на объект температуры.

В настоящее время тензорезисторы применяются в большинстве исследований напряженного состояния, проводимых в промышленности. Кроме того, тензорезисторы широко распространены в качестве чувствительных элементов датчиков, разработанных для измерения сил, моментов и давления.

Наибольшее распространение тензодатчиков сопротивления объясняется тем, что они:

- Просты в изготовлении.
- Имеют невысокую стоимость.
- Имеют малые габариты (для адекватного измерения деформации в точке).
- Стабильны по показаниям, почти безынерционны.

- Имеют линейные характеристики (линейность отклика датчика в пределах всего диапазона измерений).
- Пригодны в использовании с переменным и постоянным током.

Тензорезистор основан на принципах, сформулированных лордом Кельвином в 1856 г. (на основе серии экспериментов):

1. У проводников, подвергнутых нагрузке и (или) деформации, изменяется электрическое сопротивление.
2. Проводники, изготовленные из различных материалов, имеют различную чувствительность к деформациям.
3. Изменение сопротивления проводников, вызванное деформацией, мало, однако может быть измерено с помощью мостовой электрической схемы.

Итак, лорд Кельвин первым обратил внимание на то обстоятельство, что измерение деформации проводника сопровождается изменением его электрического сопротивления ΔR . Взаимосвязь между ΔR и деформацией ε может быть получена на основе рассмотрения однородного проводника длиной l , с площадью поперечного сечения F и удельным сопротивлением ρ (рис. 5.2):

$$R = \frac{\rho l}{F}. \quad (5.9)$$

Дифференцирование уравнения и деление полученного результата на R дает:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dF}{F}. \quad (5.10)$$

Величина dF определяет изменение поперечного сечения проводника в результате упругой деформации.

При растяжении бруса длина его увеличивается на величину Δl , ширина же уменьшается на величину $\Delta b = b - b_1$. Относительная продольная деформация равна $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$; относительная поперечная деформация равна $\varepsilon_1 = \frac{\Delta b}{b}$.

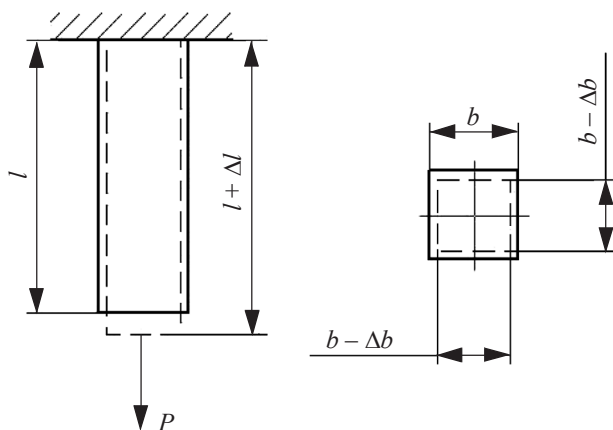


Рис. 5.2. Растяжение бруса осевой силой

При сжатии бруса продольной деформацией является укорочение, поперечной – удлинение. Опыты показывают, что для большинства материалов ε_1 в 3–4 раза меньше, чем ε .

Абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации ε_1 к относительной продольной ε называется коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона μ [27]:

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}. \quad (5.11)$$

Коэффициент поперечной деформации μ , так же как и модуль упругости E , является характеристикой упругих свойств материала. Зная μ , можно вычислить изменение объема образца. Сторона бруса после деформации равна $b - \Delta b = b - \varepsilon_1 \cdot b = b(1 - \varepsilon_1 \mu)$. Площадь после деформации равна $F(1 - \varepsilon \mu)^2$ или $b^2(1 - \varepsilon \mu)^2$. Относительное изменение площади поперечного сечения:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{F_1 - F_0}{F_0} = (1 - \varepsilon \mu)^2 - 1,$$

откуда, раскрыв скобки, получим:

$$\frac{\Delta F}{F} = -2\mu \frac{dl}{l} + \mu^2 \left(\frac{dl}{l} \right)^2 \approx -2\mu \frac{dl}{l}. \quad (5.12)$$

Подстановка выражения (5.12) в уравнение (5.11) дает:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2\mu). \quad (5.13)$$

Разделим далее полученное выражение на $\frac{dl}{l}$:

$$\frac{dR/R}{dl/l} = \frac{d\rho/\rho}{dl/l} + (1 + 2\mu). \quad (5.14)$$

Величину $\frac{dR/R}{dl/l}$ называют коэффициентом тензочувствительности. Учитывая, что $\frac{dl}{l} = \varepsilon$, получим:

$$S = \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} + (1 + 2\mu). \quad (5.15)$$

Подстановка (5.15) в (5.14) дает:

$$\frac{dR}{R} = \left[(1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \right] \cdot \varepsilon \quad (5.16)$$

или

$$\frac{dR}{R} = S \cdot \varepsilon. \quad (5.17)$$

То есть относительное изменение сопротивления равно произведению коэффициента тензочувствительности на относительную деформацию.

Для изготовления металлических резисторных датчиков обычно используются сплавы на основе никеля; в табл. 5.3 указаны наиболее часто используемые составы и соответствующие коэффициенты тензочувствительности.

Применяемые сплавы можно условно разделить на следующие группы:

- медно-никелевый сплав, например, константан, имеет низкий и контролируемый температурный коэффициент сопротивления и используется для измерения статических напряжений, когда уровень деформации ниже 15 мкм/см и температурный диапазон $-70...+230\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- никель-хромовый сплав, например, стабиллой, имеет хорошую стабильность до температуры $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и большой срок службы;

- никель-железный сплав, например, диналой, имеет высокий коэффициент тензочувствительности, но низкую температурную стабильность. Обычно применяется для измерения динамических напряжений;

- платино-вольфрамовые сплавы имеют высокую стабильность и длительный срок службы. Используются для статических измерений при температуре до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и динамических измерений при температуре до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Т а б л и ц а 5.3

**Характеристики материалов, применяемых
для изготовления тензодатчиков**

Материал (сплав)	Состав	Коэффициент тензочувствительности
Константан	40 % Ni, 60 % Cu	1,9–2,1
Адванс	45 % Ni, 55 % Cu	2,1
Изоэластик	52 % Fe, 36 % Ni, 8 % Cr, 4 % (MnMo)	3,5
Карма	74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Cu, 3 % Fe	2,1
Нихром V	80 % Ni, 20 % Cr	2,1–2,5
Платина-вольфрам	92 % Pt, 8 % W	4,1
Платино-иридиевый сплав	95 % Pt, 5 % Ir	5,8

Проволочные датчики. Общий вид прикрепленного к объекту проволочного тензодатчика показан на рис. 5.3. Проволочная решетка 1, представляющая собой ряд петель, закреплена с помощью специального клея или лака к подложке 2, к концам решетки приварены (или припаяны) выводы 3, с помощью которых датчик включается в измерительную схему. Датчик приклеивается к детали 4 и после определенного режима сушки и полимеризации клея соединяется в одно целое с деталью.

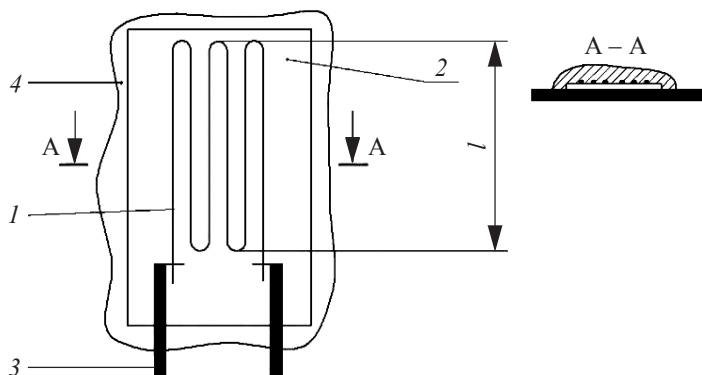


Рис. 5.3. Схема проволочного тензорезистора (пояснения в тексте)

Для таких датчиков диаметр проволоки составляет примерно 20 мкм, а толщина подложки – около 0,03 мм для пластика (полиамида или эпоксида) и 0,1 мм для бумаги.

Наибольшее распространение в отечественной тензоизмерительной технике получили тензодатчики из константановой проволоки диаметром 0,020–0,035 мм.

Основные характеристики тензодатчика:

- База – длина решетки L , мм.
- Активное сопротивление R , Ом.
- Коэффициент тензочувствительности S .

Дополнительные характеристики:

- Длина проволоки.
- Площадь поперечного сечения.
- Удельное электрическое сопротивление.

Проволочные тензодатчики изготавливаются различными по базе L :

1. Тензодатчики с малой базой $L = 2\text{--}10$ мм; $R = 50\text{--}100$ Ом.
2. Тензодатчики со средней базой $L = 10\text{--}30$ мм; $R = 100\text{--}400$ Ом.
3. Тензодатчики с большой базой $L = 30\text{--}100$ мм; $R > 200$ Ом.

Чем больше длина решетки датчика L , тем больше сопротивление и, соответственно, больше коэффициент тензочувствительности. Однако поле измеряемых деформаций обычно бывает неоднородным. Оно может изменяться. Чем больше L , тем более усредняется поле деформаций в пределах базы датчика, т. е. тем меньше точность измерения.

Для измерения выбираются датчики одной партии, имеющие минимальные различия в величинах основных характеристик. Отклонение активного сопротивления датчиков внутри партии обычно не превышает $\pm 0,2\%$ от номинала, а отклонение коэффициента тензочувствительности $S = \pm 0,2\%$.

Универсальные датчики общего типа работают при температурах от -40 до $+70$ °С. Для измерений при высоких температурах используют датчики на бакелитовой основе, специальных клеях, различных цементах.

Кроме универсальных датчиков в ряде случаев (для специальных целей) применяются датчики с базами менее $2\text{--}3$ мм (или, напротив, с $L > 200$ мм, а также датчики с фасонной решеткой).

Вследствие затрудненного отвода тепла от проволочной решетки проволочные тензодатчики допускают пропускание очень небольших токов. Так, для датчика из константановой проволоки $\varnothing 0,025$ мм допускается ток 35 мА, для проволоки $\varnothing 0,050$ мм допускается ток 100 мА. Поскольку относительные изменения сопротивления датчика обычно не превышают $0,4\text{--}0,6\%$ даже при значительных (в пределах упругости) деформациях исследуемой детали, сигнал, поступающий с проволочного тензодатчика, обычно требует усиления.

Датчики из фольги. Принципиально фольговый тензодатчик является дальнейшим развитием проволочного тензодатчика. Датчики из фольги изготавливаются по той же технологии, что и печат-

ные платы. Решетку тензодатчика выполняют из металлической фольги (обычно константановой) толщиной 0,005–0,015 мм методом фототравления. В зависимости от конфигурации и количества чувствительных элементов на одной подложке выпускаются тензорезисторы следующего исполнения: прямоугольные, розеточные и мембранные (рис. 5.4).

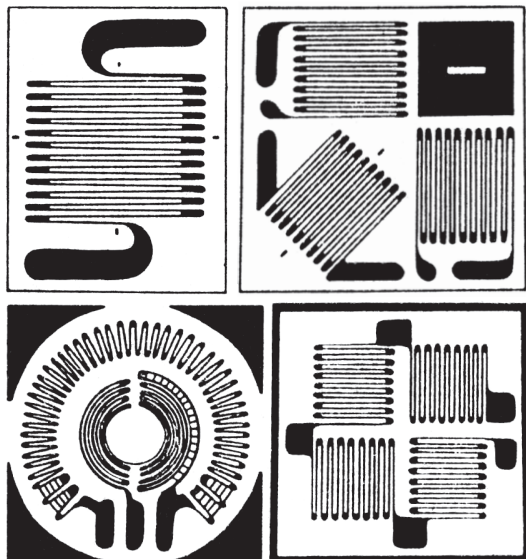


Рис. 5.4. Примеры исполнения фольговых тензорезисторов

Применение фольговых тензорезисторов позволяет:

- сократить размеры и обеспечить более точные измерения, когда существует градиент деформаций;
- оптимизировать рисунок контура датчика, в частности, утолщить поперечные части, понизив тем самым их сопротивление, и, следовательно, уменьшить влияние поперечных деформаций;
- увеличить боковую поверхность датчика с сохранением сопротивления, обеспечив таким образом лучший тепловой контакт со средой и лучшее охлаждение датчика, нагреваемого протекающим

через него током; более легкий отток джоулевой энергии измеряемого тока; вследствие этого через фольговый тензодатчик можно пропускать значительно большие токи (до 0,5 А), что в некоторых случаях позволяет отказаться от усиления снимаемого с датчика сигнала. Это обстоятельство является основным преимуществом фольговых тензодатчиков по сравнению с проволочными;

- уменьшить ошибки, возникающие из-за зазора между проводящим слоем и поверхностью образца, особенно в случае измерения изгиба, так как общая толщина фольги и подложки незначительна.

Тензодатчики, изготовленные из фольги титанового сплава, имеют тензочувствительность на порядок ниже, чем у константановых фольговых тензодатчиков ($S = 0,2$), однако подобные датчики могут работать в агрессивных средах при температурах до 200 °С и измерять (без принятия специальных мер) относительные деформации до 9–11 %.

Полупроводниковые датчики. Разработка полупроводниковых тензодатчиков явилась побочным результатом исследований, проведенных в начале 1950-х гг. промышленными компаниями с целью разработки транзистора.

Основными свойствами полупроводниковых тензодатчиков, отличающими их от проволочных, являются весьма малые размеры, очень высокая тензочувствительность ($S = 150\text{--}200$), высокий уровень выходного сигнала, позволяющий вести измерения без усилителя.

Основной элемент полупроводникового тензодатчика – сверхтонкая прямоугольная пленка монокристалла кремния, прикрепленная для удобства обращения к подложке. Поскольку сопротивление кремния приблизительно в 10^3 раз превосходит сопротивление константана, используемого в фольговых датчиках, в полупроводниковых тензодатчиках не применяется сложная конфигурация решетки для создания начального сопротивления в диапазоне $10^2\text{--}10^3$ Ом.

Применяются как наклеиваемые, так и диффузные конструкции. Наклеиваемый полупроводниковый датчик по конструкции подобен наклеиваемому металлическому датчику и дает на выходе порядка 15 мВ на 1 В напряжения питания. Диффузный полупроводниковый датчик изготавливается путем диффузии материала

датчика в поверхность диафрагмы, которая представляет собой тонкий срез монокристалла кремния. Он имеет более высокую линейность (0,05 %) и меньший гистерезис (0,01 %), чем наклеиваемые типы, но уровень выходного сигнала ниже (10 мВ/В).

Недостатками полупроводниковых тензодатчиков являются нестабильность чувствительности во времени, а также хрупкость и малая гибкость и значительно большая по сравнению с тензорезисторами цена.

Закрепление тензодатчиков на объекте измерения

Крепление датчиков на образце осуществляется клеем, обладающим прочностью, линейной упругостью и стабильностью в течение длительного периода времени. Этим требованиям удовлетворяют многие клеи. Вместе с тем многие клеи общего назначения могут не обладать достаточной стабильностью, гарантирующей точное измерение деформаций. Изготовители тензодатчиков поставляют несколько различных клеев, которые специально предназначены для конкретных условий измерения. Комбинация датчика, его несущей основы и клея создает преобразователь для измерения деформаций. Целостность данной системы, требующая самого серьезного внимания, обеспечивается применением апробированных клеев, а также соответствующих процедур нанесения и сушки.

В качестве клеев наиболее широко используются метил-2-цианоакрилат, эпоксидная смола, полиамид и некоторые виды керамики.

Клеи на основе цианоакрилата не требуют ни нагревания, ни отвердителя для инициирования полимеризации. При разбрызгивании такого клея в виде тонкой пленки между тензодатчиком и образцом и воздействии на него незначительного давления для начала полимеризации оказывается достаточным присутствие на поверхностях небольших следов влаги и (или) окислов. Для ускорения полимеризации на одну из поверхностей может быть нанесен катализатор. Благодаря чрезвычайно быстрой полимеризации клей на базе цианоакрилата является идеальным компонентом для тензодатчиков общего назначения. Цианоакрилат может использоваться в диапазоне температур от -32 до $+65$ °С. Он обеспечивает

правильное измерение деформаций не выше 6 %. Поскольку прочность клея снижается с течением времени и в результате поглощения влаги, необходимо защищать датчик от влаги при его длительной эксплуатации.

Эпоксидный клей состоит из смолы и отвердителя, который вступает в реакцию со смолой, обеспечивая полимеризацию. В некоторых случаях для снижения вязкости смолы в нее добавляется растворитель. Разбавленные смолы (или эпоксидно-фенольные смолы) более предпочтительны, так как образуют очень тонкие высокопрочные, однородные пленки со слабо выраженными ползучестью и гистерезисом. В процессе полимеризации для обеспечения тонкого, однородного слоя клея к датчику должно быть приложено давление от 70 до 210 кПа. Чтобы гарантировать полную полимеризацию, эпоксидные клеи обычно полимеризуются при повышенных температурах в течение нескольких часов. Для приготовления эпоксидного клея, применяемого в конкретных практических задачах тензометрии, выпускаются дозированные наборы компонентов. Рабочий диапазон температур эпоксидных клеев определяется их составом. По-видимому, одним из лучших является эпоксидно-фенольный клей с рабочим диапазоном температур от -269 до $+260$ °C. Допустимое относительное удлинение также зависит от состава клея и изменяется обычно в пределах 3–10 %.

Полиамид представляет собой однокомпонентный полимер, который может применяться в чрезвычайно широком диапазоне температур от -269 до $+399$ °C. Полиамид отверждается под давлением 275 кПа при температуре 260 °C. Этот клей эффективен при измерении деформаций в условиях повышенных температур, вплоть до 315 °C. Полиамид обеспечивает при комнатной температуре измерение деформаций, превышающих 2 %.

Керамические связующие, используемые для монтажа тензодатчиков, обычно состоят из смеси фосфата алюминия и кремния. Применение связующего, как правило, осуществляется в два этапа. На первом этапе наносится и высушивается тонкая пленка, являющаяся изолятором. На датчик со съемной несущей подложкой затем наносится второе покрытие. Керамика отверждается без повышения

давления при температуре около 305 °С. Рабочий диапазон температур простирается от –269 до +650 °С, причем при температуре +555 °С сопротивление утечки составляет не менее 10 Ом.

Перед наклейкой сопротивления тензорезисторов измеряют омметром с точностью до 0,01 Ом. Затем производится подготовка поверхности деталей под наклейку, которая проходит в следующем порядке:

1. Разметка поверхностей для наклейки тензорезисторов. Линии разметки не должны проходить под тензорезисторами.

2. Зачистка поверхности деталей под наклейку тензорезисторов шлифовальной шкуркой. Для наклейки датчика поверхность детали зачищается до 6-го класса чистоты, причем направление обработки должно быть перпендикулярным продольной оси датчика. Поверхность не следует полировать, так как в этом случае к ней плохо пристает клей.

3. Протирка поверхности под наклейку спиртобензиновой смесью в соотношении 1 : 1.

4. Протирка поверхности в месте наклейки тензорезисторов салфеткой из бязи, смоченной в ацетоне, затем другой салфеткой, смоченной в этиловом спирте, после чего осуществляется окончательная протирка сухой салфеткой. Очистку проводить движением в одном направлении не более трех проходов по данной поверхности каждой салфеткой.

5. Сушка поверхности при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10–15 мин.

6. Нанести на подготовленные под наклейку плоские поверхности тонкий слой клея.

7. Произвести сушку при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ примерно в течение 1 ч.

8. Поместить детали в электрошкаф и провести термообработку со следующим режимом:

- 8.1. Нагреть и выдержать при температуре 120 °С – в течение 2 ч (скорость подъема температуры 2 °С/мин).

- 8.2. Охладить до $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- 8.3. Вынуть детали из электрошкафа и охладить до $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. Нанести на поверхности деталей второй слой клея. Предварительно протереть тыльную сторону тензорезисторов этиловым

спиртом и нанести на нее кистью первый слой клея. Сушить при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на воздухе) в течение 1 ч. Нанести иглой клей на тыльную сторону тензорезисторов в двух точках по углам. Наложить тензорезисторы тыльной стороной на поверхность деталей согласно разметке.

10. Накрыть тензорезисторы прокладками из триацетатцеллюлозной пленки и резиновой пластины толщиной 2–3 мм и прижать струбцинами к поверхности деталей с удельным давлением 5 000 Па. Размеры прокладок должны перекрывать габариты тензорезисторов не менее чем на 5 мм.

11. Поместить детали в электрошкаф и провести термообработку со следующим режимом:

11.1. Нагреть и выдержать при $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ ч}$ (скорость подъема температуры $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$).

11.2. Охладить до $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11.3. Вынуть детали из электрошкафа, снять струбцины и прокладки.

11.4. Поместить детали в электрошкаф и провести повторную термообработку с режимом.

11.5. Нагреть и выдержать при $t = 185\text{ }^{\circ}\text{C} - 8-10\text{ ч}$ (скорость подъема температуры $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$).

11.6. Охладить до $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11.7. Вынуть детали из электрошкафа.

12. Измерить сопротивления каждого наклеенного тензорезистора. Изменение сопротивления относительно начального (до наклейки) не должно превышать 0,5 %.

Монтаж электрической схемы должен обеспечивать отсутствие натяжения и резких перегибов выводов тензорезистора в процессе работы.

Качество наклейки датчика во многом определяет стабильность его показаний. Слой клея должен иметь минимальную толщину, иначе затрудняется отвод тепла в деталь и увеличивается ползучесть датчика.

После наклейки, просушки и полимеризации клея измеряется сопротивление изоляции между решеткой датчика и деталью.

В нормальных условиях сопротивление изоляции датчика после наклейки должно составлять 50–100 МОм, а после полной просушки – не менее 500 МОм.

При повышенной влажности окружающей среды сопротивление изоляции снижается, ползучесть датчика увеличивается, а длительное пропускание через датчик тока может вызвать электролиз клея. С целью защиты датчика от влаги, масла и различных испарений его покрывают тонким слоем клея (БФ-2) или лака, специальными пластичными составами (мастиками); хорошие результаты дает смесь диэтилонамина и полиамина в отношении 100 : 8, образующая при затвердевании прозрачную стекловидную массу, хорошо сцепляющуюся с металлом.

Применяют также предварительную наклейку тензодатчиков на пластинки из фольги малоуглеродистой или нержавеющей стали толщиной 0,06–0,10 мм, после чего такие пластинки с датчиками приваривают специальным электроконтактным сварочным аппаратом к поверхности детали. Точность измерений таким способом оказывается вполне удовлетворительной как в случае растягивающих, так и сжимающих напряжений (деформаций), если в пределах базы датчика эпюра напряжений не имеет местных возмущений, а величины градиентов напряжений изменяются незначительно.

Тарировка тензодатчиков

Тарировка тензодатчиков проводится с главной целью – *определения коэффициента тензочувствительности*.

С этой целью используются тарировочные устройства (балочки), основу которых составляет упругий элемент, позволяющий воспроизводить с помощью нагружения заданную деформацию.

Наклеенный на деталь тензодатчик не может быть снят с нее поврежденным. Поэтому тарировка каждого датчика невозможна. Обычно тарировка проводится для нескольких датчиков из партии. Чувствительность остальных датчиков партии принимается равной средней чувствительности испытанных при тарировке.

Обычно упругий элемент выполняется в виде бруса постоянно-го сечения, подвергающегося изгибу, или бруса равного сопротив-

ления изгибу. Следует заметить, что тарировочная балка должна быть изготовлена из одинакового с исследуемой деталью материала.

Существует три типа балок.

I тип. Брус располагается на двух опорах и нагружается симметричными силами. Между опорами брус подвергается чистому изгибу, который вызывает равномерную деформацию рабочего участка длиной l (рис. 5.5, *а*).

Чистым изгибом называется такой случай изгиба, при котором поперечная сила в сечениях, перпендикулярных оси балки, обращается в нуль.

Чистый изгиб осуществим, если система внешних сил, приложенных к некоторому участку балки, приводится к парам сил. На практике, однако, чистый изгиб возможен лишь в случаях, когда собственный вес балки достаточно мал по сравнению с величинами приложенных к ней внешних сил, и им можно пренебречь.

Это позволяет наклеивать тензорезистор в любом месте по всей длине между опорами. Относительную деформацию наружных волокон определяют через прогиб f в середине бруса [4]:

$$\varepsilon = 4f \frac{h}{l^2}. \quad (5.18)$$

II тип. Брус располагается также на двух опорах и нагружается симметричными силами, приложенными между опорами и смещенными внутрь на расстояние a (рис. 5.5, *б*). Между точками приложения сил брус также подвергается чистому изгибу, который вызывает равномерную деформацию рабочего участка длиной $l - 2a$.

Относительную деформацию наружных волокон определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{12h}{3l^2 - 4a^2} f. \quad (5.19)$$

В обоих случаях для измерения стрелы прогиба f используют индикатор перемещения часового типа с ценой деления 0,01; 0,002 и 0,001 мм.

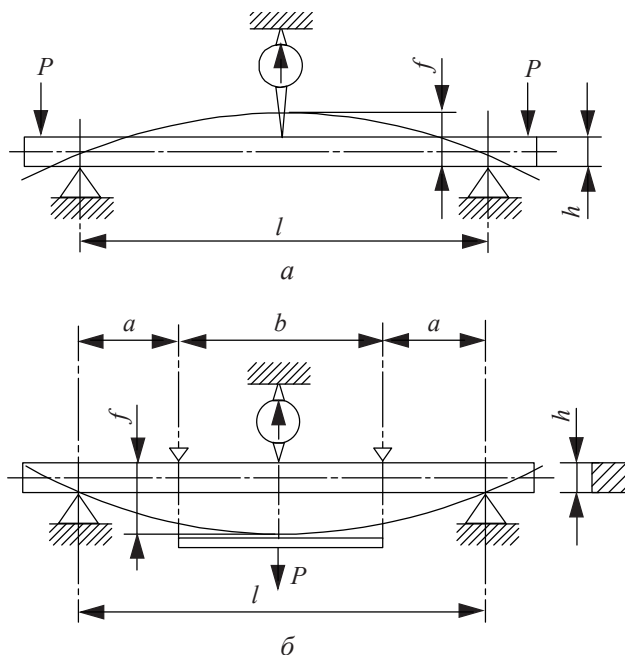


Рис. 5.5. Балка постоянного сечения, подвергающаяся изгибу:
 a – тип I; $б$ – тип II

Балки I и II типов изготавливаются шириной, равной 20–30 мм, что позволяет устранять ошибки, вносимые толщиной клея и другими факторами.

Точность воспроизведения деформации на тарировочном устройстве зависит от точности изготовления упругого элемента (бруса). Брус должен быть тщательно выполнен – с допусками на непараллельность не более $+0,0025$ мм и по толщине не более $\pm 0,01$ мм. При больших допусках возрастают погрешности определения тензочувствительности. Тензорезисторы наклеиваются на рабочий участок из той же партии, что и рабочие тензорезисторы, наклеенные на исследуемый объект.

III тип. Брус выполняется в виде консольной балки равного сопротивления изгибу. Нагрузка прикладывается в точке пересечения боковых сторон балки (рис. 5.6).

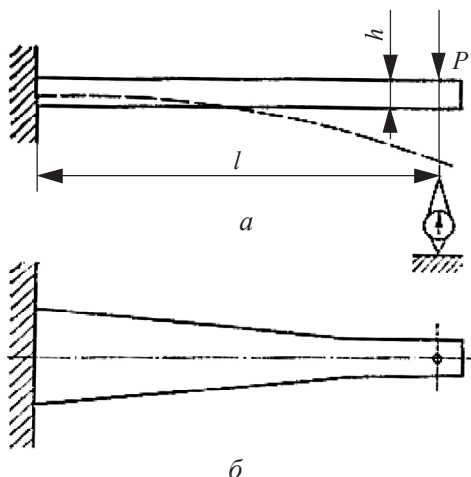


Рис. 5.6. Балка равного сопротивления изгибу:

a – вид сбоку; $б$ – вид сверху

В пределах клиновидной рабочей балки, используемой для наклейки тарированных датчиков, напряжения (местные деформации) при заданной нагрузке равны по величине.

Толщина тарировочной балки равного сопротивления постоянна и равна h , а ее ширина $b(x)$ изменяется:

$$b(x) = b_0 \frac{x}{l}. \quad (5.20)$$

Момент сопротивления произвольного сечения балки:

$$W(x) = \frac{b(x) \cdot h^2}{6} = \frac{b_0 \cdot x \cdot h^2}{6l}. \quad (5.21)$$

Изгибающий момент в сечении балки с координатой

$$M(x) = P \cdot x, \quad (5.22)$$

а нормальное напряжение

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{W(x)} = \frac{P \cdot x \cdot 6 \cdot l}{b_0 \cdot x \cdot h^2} = \frac{6 \cdot l}{b_0 \cdot h^2} \cdot P = K_\sigma \cdot P, \quad (5.23)$$

где $K_\sigma = \frac{6l}{b_0 h^2}$.

Величина K_σ называется постоянной балки и вычисляется по результатам замера ее геометрических характеристик.

Таким образом, напряжения в тарировочной балке определяются величиной приложенной к ней нагрузки P и могут быть легко вычислены. Измерив в балке эти известные напряжения (деформации) с помощью наклеенных на балку датчиков, строят тарировочный график $\sigma(\varepsilon) = f(y)$, где y – показания регистрирующего прибора. Определив цену деления регистрирующего прибора (масштаб отклонения датчика гальванометра осциллографа или цену деления реохорда статического тензометра), производят пересчет измеренных при эксперименте в делениях регистрирующего прибора величин напряжений или деформаций.

Можно также вычислить относительную деформацию наружных волокон по формуле [4] или определить экспериментально стрелу прогиба f , а затем вычислить по формуле

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} \cdot f. \quad (5.25)$$

Точность воспроизведения деформации на балке III типа также зависит от точности изготовления упругого элемента.

Во всех трех типах балок по результатам измерений ε и ΔR по формуле

$$S = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (5.26)$$

определяют средний коэффициент тензочувствительности, который принимается постоянным для всей партии используемых тензорезисторов. В некоторых случаях, например, в силоизмерительных устройствах и прогибомерах, тарировку осуществляют непосредственно на детали.

Включение тензодатчиков в измерительные схемы

Наиболее известной измерительной схемой, позволяющей с высокой точностью определять изменение сопротивлений, является мостовая схема. Она состоит из четырех последовательно соединенных сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , источника питания и измерительного прибора. К точкам a и b подводится питание моста, к точкам c и d присоединяется измерительный прибор. Точки a и b называются питающей диагональю, точки c и d – измерительной диагональю. Мостовая электрическая схема изображается в виде ромба, стороны которого называются плечами. Плечо моста может состоять из одного или нескольких сопротивлений, соединенных различными способами (последовательно, параллельно, смешанно) [28].

Кроме измерения мостовой схемой иногда применяется полумостовая схема, когда на детали наклеивают два плеча моста (датчики R_1 и R_2), соединенных с балансировочными сопротивлениями R_3 и R_4 , которые находятся в усилителе.

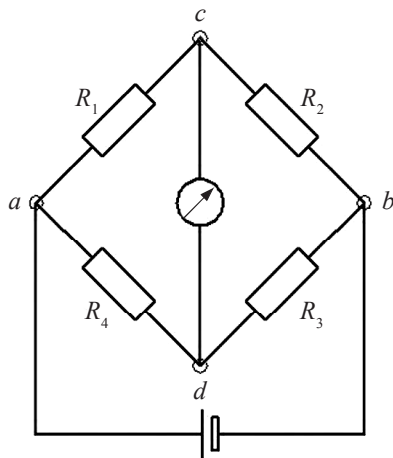


Рис. 5.7. Мостовая схема включения тензорезисторов
(пояснения в тексте)

Мосты бывают симметричными и несимметричными. Если сопротивления плеч моста не равны друг другу: $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$, то такие мосты называются несимметричными. Если $R_1 = R_2 = R$, а $R_3 = R_4 = R_n$, то такие схемы называются симметричными относительно измерительной диагонали. Если $R_1 = R_4 = R$, а $R_2 = R_3 = R_n$, то такие схемы называются симметричными относительно питающей диагонали. Если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, то такие схемы называются равноплечими мостами. Нами будут рассматриваться только схемы с равноплечими мостами.

Если мост сбалансирован, т. е. ток в измерительной диагонали отсутствует, то

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4. \quad (5.27)$$

Если соотношение (5.27) выполняется, то напряжение на выходе моста равно нулю, несмотря на наличие напряжения на входе, и мост находится в состоянии электрического равновесия (мост сбалансирован). Это важное свойство моста используется для измерения электрических сопротивлений. Если на выходе моста разность потенциалов не равна нулю и через измерительную цепь проходит ток, мост называется неуравновешенным или несбалансированным. При изменении активного сопротивления R_1 на ΔR_1 равновесие моста нарушается и через регистрирующий прибор протекает ток разбаланса I_p . Его значение зависит от степени разбаланса и питающего напряжения $V_{\text{н}}$. В тензометрических измерениях мостовая схема используется для непосредственного отсчета тока разбаланса I_p либо для измерений методом сбалансированного моста (нулевой метод).

Выражение (5.27) справедливо, если мост составлен только из активных сопротивлений. В реальных условиях всегда есть и емкостные сопротивления (особенно при длинных соединительных проводах), поэтому рост должен быть сбалансирован и по емкостным сопротивлениям, так как в противном случае измерения будут ошибочными (ошибка возрастает с увеличением частоты питающего напряжения и длины проводов).

Из анализа схемы, представленной на рис. 5.7, используя законы Кирхгофа, получили расчетные соотношения для определения тока разбаланса:

$$I_p = V_{\Pi} \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_{\Pi p} r}, \quad (5.28)$$

где $r = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + (R_3 + R_4)R_1R_2 + R_3R_4(R_1 + R_2)$.

Ток разбаланса I_p можно выразить так же, как функцию питающего мост тока I_0 :

$$I_p = I_0 \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_{\Pi p} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}. \quad (5.29)$$

Если $R_1R_3 - R_2R_4$, ток в измерительной диагонали равен нулю, т. е. мост сбалансирован. Если сопротивление регистрирующего прибора $R_{\Pi p} \approx \infty$, ток I_p практически равен нулю. Тогда выходной величиной будет напряжение разбаланса, которое определяется из соотношения

$$\Delta V = V_{\Pi} \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = I_0 \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (5.30)$$

Таким образом, с помощью мостовой схемы можно преобразовать изменения сопротивления в одном или нескольких плечах в соответствующие изменения силы тока или напряжения в ее измерительной диагонали.

Оценкой качества работы мостовой схемы является характеристика преобразования, показывающая зависимость тока разбаланса от относительного приращения сопротивления в одном или нескольких активных плечах, или чувствительность мостовой схемы, которая может быть выражена как отношение приращения параметра схемы ΔI , ΔV к деформации.

Анализ показывает, что:

- 1) характеристика преобразования моста нелинейна;
- 2) приращения сопротивления одного знака в смежных плечах (например, R_1 и R_2) вызывают ток разбаланса противоположных направлений;

3) характеристика в области отрицательных приращений сопротивления круче, чем в области положительных.

Для оценки степени нелинейности характеристики сравнивают длины отрезков $a\delta$ и $a'\delta'$ (рис. 5.8).

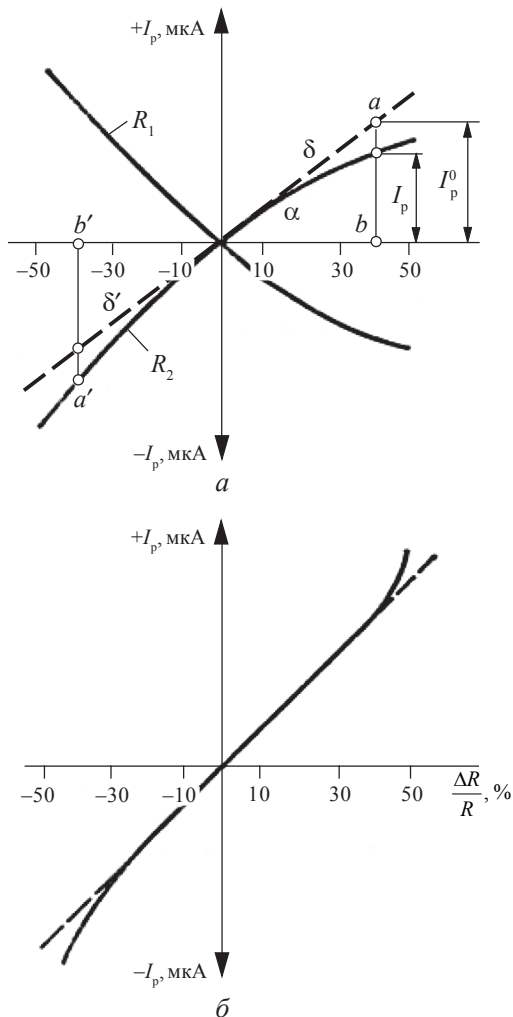


Рис. 5.8. Характеристика преобразования симметричного моста с одним (а) и двумя (б) активными плечами

Относительная степень нелинейности характеристики моста определяется из выражения

$$N \frac{I_p^0 - I_p}{I_p^0}, \quad (5.31)$$

где I_p^0 – ток разбаланса, соответствующий максимальному относительному приращению сопротивления в активном плече для идеальной характеристики с наклоном α ; I_p – ток разбаланса для реальной характеристики. Так как изменение относительного сопротивления проволочного тензорезистора при измерении деформации находится в пределах 2 %, то характеристика моста, построенная для небольшого интервала изменений относительного сопротивления в активном плече (до нескольких процентов), считается строго линейной. Характеристика тензомоста с одним рабочим плечом считается строго линейной.

Температурная компенсация

При проведении тензоизмерений с особым вниманием необходимо относиться к температурной компенсации. Колебания температуры во время проведения эксперимента приводят к изменению длины проводника тензорезистора:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta t; \quad (5.32)$$

к изменению материала базы (т. е. объекта, на который прикрепляется тензодатчик):

$$\frac{\Delta l}{l} = \beta \cdot \Delta t; \quad (5.33)$$

к изменению температурного коэффициента сопротивления материала тензорезистора:

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma \cdot \Delta t. \quad (5.34)$$

Общее изменение сопротивления тензорезистора при колебании температуры:

$$\frac{\Delta R}{R} = [(\beta - \alpha)S + \gamma] \Delta t, \quad (5.35)$$

где α и β – температурные коэффициенты линейного расширения материала тензорезистора и объекта соответственно; γ – температурный коэффициент сопротивления материала тензорезистора; S – коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Если температурные коэффициенты линейного расширения материала тензорезистора и объекта исследования $\alpha \neq \beta$, то это приводит к возникновению фиктивной деформации $\varepsilon_{\phi} = (\beta - \alpha)\Delta t$, которая эквивалентна некоторой деформации, вызываемой внешними нагрузками. Фиктивная деформация преобразуется в выходной сигнал, пропорциональный изменению сопротивления тензорезистора, и различить сигналы, вызванные фиктивной и действительной деформацией, невозможно.

Температурная компенсация имеет большое значение, особенно при измерении статических деформаций, когда за время настройки и регулировки измерительной аппаратуры температура может измениться. Например, если используются константановые датчики, то изменение температуры на 1°C равносильно изменению напряжений в стальной детали на $(8 \pm 2)10^{-1}$ МПа.

На практике температурная компенсация моста достигается с помощью компенсационного датчика, который наклеивают на той же поверхности, что и активный рабочий датчик, или на отдельную пластину из того же материала, что и деталь, причем температурные условия рабочего и компенсационного датчиков должны быть идентичны.

Измерение параметров.

Методы измерений показаний датчиков

Существуют два метода измерения показаний датчиков: метод прямых отсчетов и нулевой.

Метод определения измерения сопротивления датчиков, основанный на измерении величины тока в диагонали работающего

в неравновесном режиме моста, носит название метода прямых отсчетов.

Если мост после измерения сопротивления датчика снова балансируется вводом в соответствующее плечо дополнительного сопротивления, то основанный на этом метод измерения называется нулевым методом.

Балансировка моста, разбаланс которого вызван изменением сопротивления датчика, производится с помощью балансировочного сопротивления R_5 (обычно реохорда).

При нулевом методе измерений измерение напряжения источника питания не влияет на результаты измерения, так как в момент отсчета ток через гальванометр не идет (рис. 5.9). В то же время в случае метода прямых отсчетов изменение напряжения U вносит погрешности, поскольку сила тока в диагонали моста пропорциональна напряжению питания. Поэтому для более точных измерений применяют нулевой метод, несмотря на то, что он требует больших затрат времени для измерений. В тех случаях, когда нулевой метод использовать невозможно, например, при быстроизменяющихся во времени нагрузках, используют метод прямых отсчетов. При данном способе необходимо стабилизировать питающее напряжение.

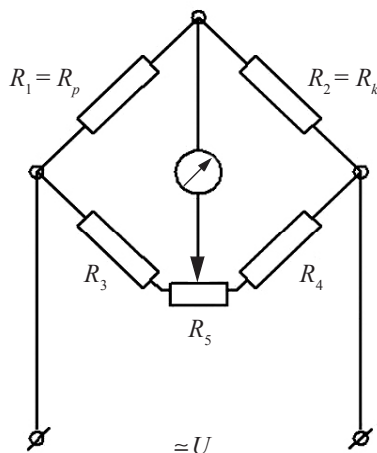


Рис. 5.9. Схема моста при измерениях нулевым методом

Сигнал, получаемый с тензодатчиков, имеет очень небольшую мощность, поскольку сила тока через датчик ограничивается из условий его нагрева и не превышает обычно нескольких десятков миллиампер. Поэтому при измерении малых деформаций приходится применять измерительные приборы очень высокой чувствительности или вводить в схему усилитель Y (рис. 5.10), который усиливает сигнал разбалансированного моста и подает его затем, например, на шлейфный гальванометр Π осциллографа.

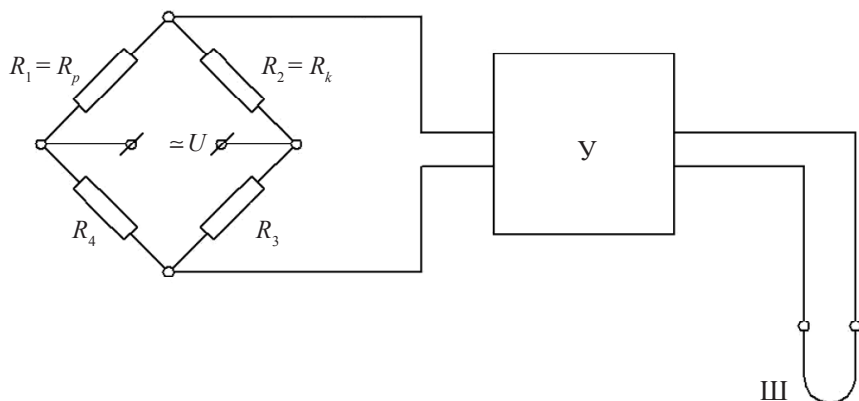


Рис. 5.10. Измерительная мостовая схема с усилителем

При безусилительной схеме чаще всего используют гальванометры с постоянной по току $(3-5) \cdot 10^{-6}$ Ом/мм. При менее чувствительных гальванометрах приходится собирать более мощные мосты (с большим числом датчиков).

При работе по усилительной схеме необходимо располагать тензостанцией; провода, соединяющие ее с измерительным мостом, во избежание наводок должны быть экранированными.

Чтобы обеспечить стабильность измерений, идентичность условий работы датчиков при измерениях и тарировке, следует поддерживать постоянным питающее напряжение (т. е. нужен стабилизатор напряжения), обеспечить устойчивую температурную компенсацию моста и надежность контактов в измерительной схеме.

Последнее обстоятельство имеет особую важность при измерении крутящего момента с помощью датчиков, наклеенных на вращающийся вал. В этом случае связь датчиков с аппаратурой осуществляется через контактные кольца и токосъемники, от условий работы которых зависит стабильность показаний регистрирующей аппаратуры. Поэтому применять полумостовую схему (когда на детали наклеивают только два датчика) не рекомендуется, поскольку токосъемное устройство оказывается включенным последовательно с датчиками, а изменения его переходного сопротивления могут быть соизмеримы с изменениями сопротивления датчика при деформации. Полная мостовая схема лишена этого недостатка.

Чтобы исключить нестабильность показаний приборов из-за возможного смещения проводов друг относительно друга (когда меняется емкость цепи), их следует увязать в жгут или затянуть в трубку.

5.2.3. Пьезодатчики. Пьезоизмерительная система

Пьезоэлектрический эффект – эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект). Существует и обратный пьезоэлектрический эффект – возникновение механических деформаций под действием электрического поля. То есть в некоторых кристаллах поляризация может возникнуть и без внешнего поля, если кристалл подвергается механическим деформациям. Это явление, открытое братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 г., получило название пьезоэлектрического эффекта.

Чтобы обнаружить пьезоэлектрические заряды, на грани кристаллической пластинки накладывают металлические обкладки. При разомкнутых обкладках между ними при деформации появляется разность потенциалов. При замкнутых обкладках на них образуются индуцированные заряды, равные по величине поляризационным зарядам, но противоположные им по знаку, и в цепи, соединяющей обкладки, в процессе деформации возникает ток. Рассмотрим основные особенности пьезоэлектрического эффекта на примере кварца. Кристаллы кварца SiO_2 существуют в различных кристаллографических модификациях. Интересующие нас кристаллы (α -кварц)

принадлежат к так называемой тригональной кристаллографической системе и обычно имеют форму, показанную на рис. 5.11. Они напоминают шестигранную призму, ограниченную двумя пирамидами, однако имеют еще ряд дополнительных граней. Такие кристаллы характеризуются четырьмя кристаллическими осями, определяющими важные направления внутри кристалла.

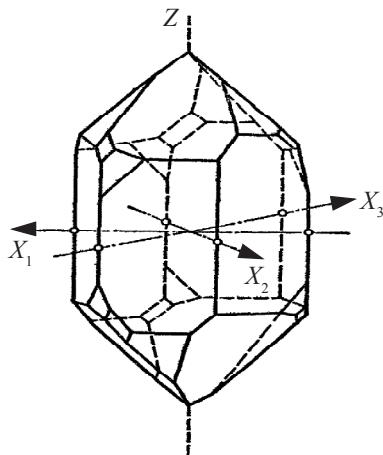


Рис. 5.11. Кристалл кварца

Одна из этих осей – Z соединяет вершины пирамид. Три другие X_1 , X_2 , X_3 перпендикулярны к оси Z и соединяют противоположные ребра шестигранной призмы. Направление, определяемое осью Z , пьезоэлектрически неактивно: при сжатии или растяжении по этому направлению никакой поляризации не происходит. Напротив, при сжатии или растяжении в любом направлении, перпендикулярном к оси Z , возникает электрическая поляризация. Ось Z называется оптической осью кристалла, а оси X_1 , X_2 , X_3 – электрическими или пьезоэлектрическими осями.

Рассмотрим пластинку кварца, вырезанную перпендикулярно к одной из пьезоэлектрических осей X . Ось, перпендикулярную к Z и X , обозначим через Y (рис. 5.12). Тогда оказывается, что при растяжении пластинки вдоль оси X на перпендикулярных

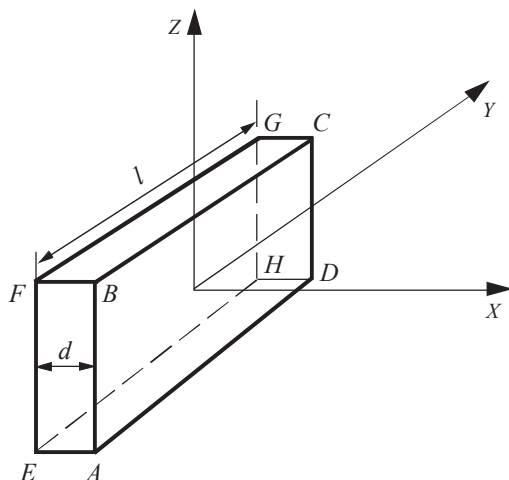


Рис. 5.12. Кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно к пьезоэлектрической оси

к ней гранях $ABCD$ и $EFGH$ появляются разноименные поляризационные заряды. Такой пьезоэлектрический эффект называется продольным. Если изменить знак деформации, т. е. перейти от растяжения к сжатию, то и знаки поляризационных зарядов изменятся на обратные.

Возникновение поляризационных зарядов определенных знаков при данном типе деформации (растяжение или соответственно сжатие) показывает, что концы осей X не равноправны, и осям X можно приписать определенные направления (что отмечено на рис. 5.12 стрелками). Это значит, что при данной деформации знак заряда зависит от того, направлена ли ось X по внешней нормали к грани или по внутренней. Такие оси с неравноправными концами получили название полярных осей. В отличие от полярных осей X_1, X_2, X_3 , концы оси Z совершенно равноправны и она является неполярной осью.

Неравноправность концов полярной оси проявляется, конечно, не только в пьезоэлектрическом эффекте, но и в других явлениях. Так, например, скорость химического травления граней, расположенных у разных концов полярной оси, оказывается различной и получающиеся при этом фигуры травления отличаются друг от друга.

Наряду с продольным пьезоэлектрическим эффектом существует также поперечный пьезоэлектрический эффект. Он заключается в том, что при сжатии или растяжении вдоль оси Y возникает поляризация вдоль оси X и на тех же гранях $ABCD$ и $EFGH$ появляются поляризационные заряды. При этом оказывается, что знаки зарядов на каждой грани при сжатии вдоль Y (в поперечном эффекте) такие же, как при растяжении вдоль X (в продольном эффекте).

Пьезоэлектрический эффект объясняется следующим образом. В ионных кристаллах вследствие несовпадения центров положительных и отрицательных ионов имеется электрический момент и в отсутствие внешнего электрического поля. Однако эта поляризация обычно не проявляется, так как она компенсируется зарядами на поверхности. При деформации кристалла положительные и отрицательные ионы решетки смещаются друг относительно друга, и поэтому изменяется электрический момент кристалла. Это изменение электрического момента и проявляется в пьезоэлектрическом эффекте.

Рис. 5.13 качественно поясняет возникновение пьезоэлектрического эффекта в кварце. Здесь схематически показаны проекции положительных ионов Si (заштрихованные кружки) и отрицательных ионов O_2 (светлые кружки) в плоскости, перпендикулярной к оптической оси Z . Этот рисунок не соответствует фактической конфигурации ионов в элементарной ячейке кварца, в которой ионы не лежат в одной плоскости, а их число больше показанного. Он, однако, правильно передает симметрию взаимного расположения ионов, что уже достаточно для качественного объяснения.

Рис. 5.13, *а* соответствует недеформированному кристаллу. На грани A , перпендикулярной к оси X_1 , имеются выступающие положительные заряды, а на параллельной ей грани B – выступающие отрицательные заряды. При сжатии вдоль оси X_1 (рис. 5.13, *б*) элементарная ячейка деформируется. При этом положительный ион 1 и отрицательный ион 2 «вдавливается» внутрь ячейки, отчего выступающие заряды (положительный на плоскости A и отрицательный на плоскости B) уменьшаются, что эквивалентно появлению отрицательного заряда на плоскости A и положительного

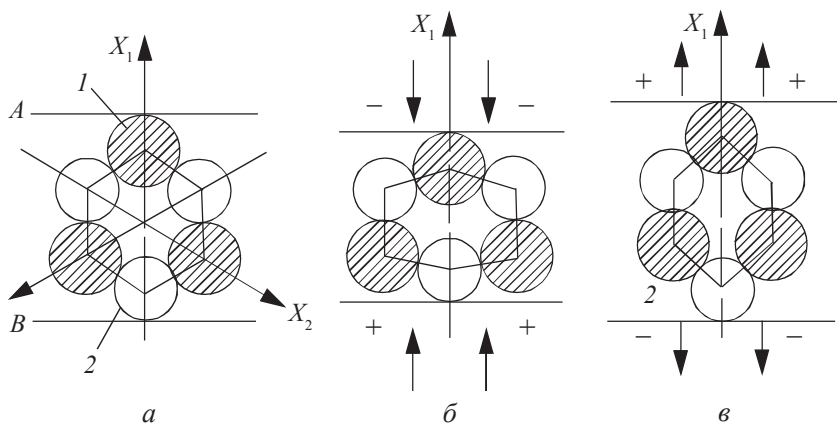


Рис. 5.13. Проявление пьезоэлектрического эффекта
(пояснения в тексте)

заряда на плоскости B . При растяжении вдоль оси X_1 имеет место обратное (рис. 5.13, в): ионы 1 и 2 «выталкиваются» из ячейки. Поэтому на грани A возникает дополнительный положительный заряд, а на грани B – отрицательный заряд.

Расчеты в теории твердого тела в согласии с опытом показывают, что пьезоэлектрический эффект может существовать только в таких кристаллах, в которых элементарная ячейка не имеет центра симметрии. Так, например, элементарная ячейка кристаллов CsCl (рис. 5.14) имеет центр симметрии, и эти кристаллы не обнаруживают пьезоэлектрических свойств. Расположение же ионов в ячейке кварца таково, что в нем центр симметрии отсутствует, и поэтому в нем возможен пьезоэлектрический эффект.

Величина вектора поляризации P (и пропорциональная ей поверхностная плотность пьезоэлектрических зарядов σ') в определенном интервале изменений пропорциональна величине механических деформаций. Обозначим через u деформацию одностороннего растяжения вдоль оси X :

$$u = \Delta d / d, \quad (5.36)$$

где d – толщина пластинки, а Δd – ее изменение при деформации.

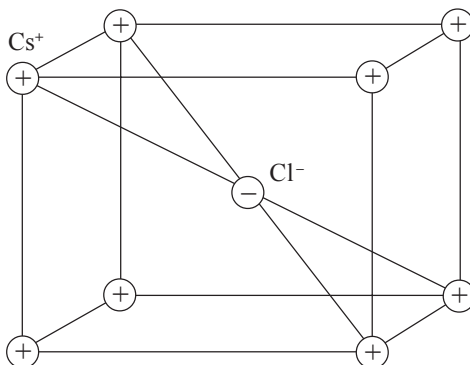


Рис. 5.14. Элементарная ячейка кристалла хлористого цезия CsCl

Тогда, например, для продольного эффекта имеем:

$$P = Px = \beta u. \quad (5.37)$$

Величина β называется пьезоэлектрическим модулем. Знак β может быть как положительным, так и отрицательным. Так как u безразмерная величина, то β измеряется в тех же единицах, что и P , т. е. в Кл/Н. Величина поверхностной плотности пьезоэлектрических зарядов на гранях, перпендикулярных к оси X , равна $\sigma' = Px$.

Вследствие возникновения пьезоэлектрической поляризации при деформации изменяется и электрическое смещение D внутри кристалла. В этом случае в общем определении смещения под P нужно понимать сумму $Pe + Pu$, где Pe обусловлено электрическим полем, а Pu – деформацией. В общем случае направления E , Pe и Pu не совпадают и выражение для D получается сложным. Однако для некоторых направлений, совпадающих с осями высокой симметрии, направления указанных векторов оказываются одинаковыми.

Пьезоэлектрический эффект возникает не только при деформации одностороннего растяжения, но и при деформациях сдвига.

Пьезоэлектрические свойства наблюдаются, кроме кварца, у большого числа других кристаллов. Гораздо сильнее, чем у кварца, они выражены у сегнетовой соли. Сильными пьезоэлектриками

являются кристаллы соединений элементов 2-й и 6-й групп периодической системы (CdS, ZnS), а также многих других химических соединений.

Наряду с пьезоэлектрическим эффектом существует и обратное ему явление: в пьезоэлектрических кристаллах возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями. Поэтому, если на металлические обкладки, укрепленные на кристалле, подать электрическое напряжение, то кристалл под действием поля поляризуется и деформируется.

Легко видеть, что необходимость существования обратного пьезоэффекта следует из закона сохранения энергии и факта существования прямого эффекта. Рассмотрим пьезоэлектрическую пластинку (рис. 5.15) и предположим, что мы сжимаем ее внешними силами F .

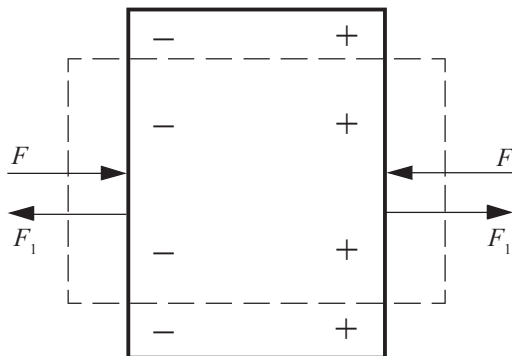


Рис. 5.15. Связь прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов

Если бы пьезоэффекта не было, то работа внешних сил равнялась бы потенциальной энергии упругодеформированной пластинки. При наличии пьезоэффекта на пластинке появляются заряды и возникает электрическое поле, которое заключает в себе дополнительную энергию. По закону сохранения энергии отсюда следует, что при сжатии пьезоэлектрической пластинки совершается большая работа, а значит, в ней возникают дополнительные силы F_1 , проти-

действующие сжатию. Это и есть силы обратного пьезоэффекта. Из приведенных рассуждений вытекает связь между знаками обоих эффектов. Если в обоих случаях знаки зарядов на гранях одинаковы, то знаки деформаций различны. Если при сжатии пластинки на гранях появляются заряды, указанные на рис. 5.15, то при создании такой же поляризации внешним полем пластинка будет растягиваться.

Обратный пьезоэлектрический эффект имеет внешнее сходство с электрострикцией. Однако оба эти явления различны. Пьезоэффект зависит от направления поля и при изменении направления последнего на противоположное изменяет знак. Электрострикция же не зависит от направления поля. Пьезоэффект наблюдается только в некоторых кристаллах, не обладающих центром симметрии. Электрострикция имеет место во всех диэлектриках, как твердых, так и жидких.

Если пластинка закреплена и деформироваться не может, то при создании электрического поля в ней появится дополнительное механическое напряжение. Его величина s пропорциональна напряженности электрического поля внутри кристалла:

$$s = -\beta E, \quad (5.38)$$

где β — тот же пьезоэлектрический модуль, что и в случае прямого пьезоэффекта. Минус в этой формуле отражает указанное выше соотношение знаков прямого и обратного пьезоэффектов.

Полное механическое напряжение внутри кристалла складывается из напряжения, вызванного деформацией, и напряжения, возникшего под влиянием электрического поля. Оно равно:

$$s = Cu - \beta E. \quad (5.39)$$

Здесь C есть модуль упругости при деформации одностороннего растяжения (модуль Юнга) при постоянном электрическом поле. Формулы (5.38) и (5.39) являются основными соотношениями в теории пьезоэлектричества.

При написании формул мы выбирали u и E в качестве независимых переменных и считали D и s их функциями. Это, конечно, необязательно, и мы могли бы считать независимыми пере-

менными другую пару величин, одна из которых – механическая, а другая – электрическая. Тогда мы получили бы тоже два линейных соотношения между u , s , E и D , но с другими коэффициентами. В зависимости от типа рассматриваемых задач удобны различные формы записи основных пьезоэлектрических соотношений.

Так как все пьезоэлектрические кристаллы анизотропны, то постоянные ε , S и β зависят от ориентации граней пластинки относительно осей кристалла. Кроме того, они зависят от того, закреплены боковые грани пластинки или свободны (зависят от граничных условий при деформации). Чтобы дать представление о порядке величины этих постоянных, мы приведем их значения для кварца в случае, когда пластинка вырезана перпендикулярно оси X и ее боковые грани свободны: при толщине пластинки 0,5 см напряжение между обкладками будет равно $U \sim 30$ В. Мы видим, что пьезоэлектрические поля и напряжения могут быть весьма значительными. Применяя вместо кварца более сильные пьезоэлектрики и используя должным образом выбранные типы деформации, можно получать пьезоэлектрические напряжения, измеряемые многими тысячами вольт.

Пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный) широко применяется для устройства различных электромеханических преобразователей. Для этого иногда используют составные пьезоэлементы, предназначенные для осуществления деформаций разного типа.

На рис. 5.16 показан двойной пьезоэлемент (составленный из двух пластинок), работающий на сжатие. Пластинки вырезаны из кристалла таким образом, что они одновременно либо сжимаются, либо растягиваются. Если, наоборот, сжимать или растягивать такой пьезоэлемент внешними силами, то между его обкладками появляется напряжение. Соединение пластинок в этом пьезоэлементе соответствует параллельному соединению конденсаторов.

Пьезоэлектрики являются обратимыми электромеханическими преобразователями, т. е. способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и, наоборот, электрическую энергию в механическую. Преобразователи, основанные на использовании прямого пьезоэффекта, называют преобразователями-генераторами;

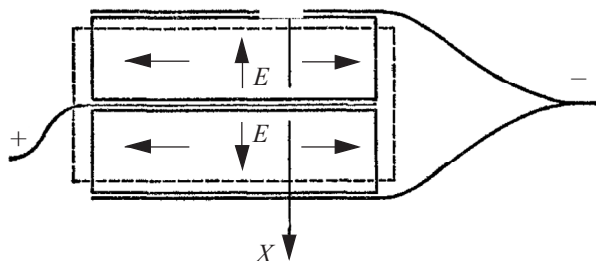


Рис. 5.16. Двойной пьезоэлемент, работающий на сжатие

они имеют механический вход и электрический выход. Преобразователи, основанные на использовании обратного пьезоэффекта, называют преобразователями-двигателями; они имеют электрический вход и механические выходы. Известно множество пьезоэлектрических устройств, основанных на использовании как прямого, так и обратного эффектов. Прямой эффект используется, например, в микрофонах, звукозаписывающих устройствах, датчиках механических сил, перемещений и ускорений, бытовых зажигалках для газа и др. Обратный эффект послужил основой для создания телефонов, громкоговорителей, ультразвуковых излучателей, реле, двигателей и т. п.

Известны и нашли практическое применение пьезоэлектрические преобразователи – пьезоэлектрические трансформаторы (сокращенно пьезотрансформаторы). Схематически устройство пьезотрансформатора изображено на рис. 5.17, поясняящем, что он представляет собой пьезоэлектрический преобразователь в виде четырехполюсника, имеющего только электрические вход и выход.

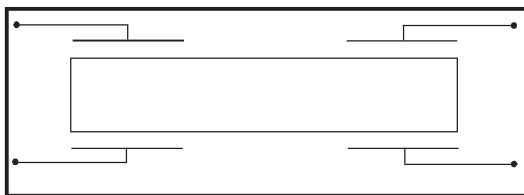


Рис. 5.17. Пьезоэлектрический трансформатор

Действие пьезотрансформатора основано на использовании как прямого, так и обратного пьезоэффектов. Электрическое напряжение, приложенное к входным электродам пьезотрансформатора, в результате обратного пьезоэффекта вызывает деформацию всего объема пьезоэлектрика, и на выходных электродах возникает электрическое (вторичное) напряжение как следствие прямого пьезоэффекта. В пьезотрансформаторе происходит как бы двойное преобразование энергии – электрической в механическую, а затем механической в электрическую. Как и электромагнитный трансформатор, пьезотрансформатор используют для преобразования электрического напряжения. Подбором размеров электродов и их расположения можно получать различные значения коэффициента трансформации. Пьезотрансформаторы обычно используют в резонансном режиме, при котором достигаются большие значения коэффициента трансформации (порядка нескольких сотен). Пьезотрансформаторы используют в высоковольтных источниках вторичного электропитания.

Таким образом, пьезоэлемент представляет собой электрический конденсатор с твердым (кристаллическим или керамическим) диэлектриком. Особенностью такого конденсатора является наличие пьезоэлектрических свойств у диэлектрика, заполняющего пространство между электродами. Ниже будет показано, какое значение имеет наличие пьезоэффекта и каким образом он оказывает влияние на электрические и механические характеристики пьезоэлемента. Если пьезоэлемент используется как электромеханический преобразователь, то его ориентацию выбирают исходя из требований достижения наибольшего эффекта. Внешние силы (как механические, так и электрические), воздействующие на пьезоэлемент, могут быть как распределенными, так и сосредоточенными. Распределенные силы позволяют достичь более эффективного преобразования. Поэтому для более эффективной поляризации объема пьезоэлектрика используют электроды, покрывающие всю площадь граней пьезоэлемента, а для создания равномерно распределенного механического напряжения – накладки из упругого материала, хорошо прилегающие к граням пьезоэлемента и преобразующие внешние сосредоточенные силы в распределенные.

Внешняя сила вызывает деформацию пьезоэлемента, его поляризацию и возникновение на электродах противоположных электрических зарядов. Величина электрического заряда или возникающего при этом напряжения может быть измерена соответствующим измерительным прибором, присоединенным к электродам пьезоэлемента. Внешняя сила сообщает пьезоэлементу энергию в виде упругой деформации, которая может быть рассчитана, если известны величины воздействующей силы и жесткость пьезоэлемента. Одновременно с деформацией пьезоэлемента на его электродах возникает электрическое напряжение. Следовательно, часть энергии, сообщаемой пьезоэлементу внешней силой, оказывается электрической, и ее величина может быть рассчитана, если известны электрическое напряжение на электродах и емкость пьезоэлемента.

Внешняя механическая сила, воздействующая на пьезоэлемент, сообщает последнему энергию W_0 в виде энергии упругой деформации и энергии заряда емкости пьезоэлемента. Если обозначить энергию упругой деформации пьезоэлемента через W_m , а электрическую энергию заряда его емкости через W_e , то полная энергия W_0 , сообщенная пьезоэлементу, будет равна их сумме. Как во всяком обратимом преобразователе, при этом возникает обратное действие (пьезоэлектрическая реакция), заключающееся в том, что возникшее вследствие прямого пьезоэффекта электрическое напряжение создает (уже в результате обратного пьезоэффекта) механические напряжения и деформации, противодействующие внешним силам. Это проявляется в увеличении жесткости пьезоэлемента. Если электрическое напряжение, возникающее вследствие пьезоэффекта, исключить, например, закоротив электроды пьезоэлемента, то обратного пьезоэлектрического действия наблюдаться не будет, следовательно, должно произойти уменьшение жесткости пьезоэлемента.

Подобные же рассуждения можно сделать и для случая обратного пьезоэффекта, т. е. воздействия на пьезоэлемент внешней электрической силы. При этом внешний источник электрической энергии сообщает пьезоэлементу энергию в виде энергии заряда емкости пьезоэлемента и механической энергии его упругой деформации. Здесь также имеет место обратное действие. Если воспрепятствовать деформации жестким захватом пьезоэлемента, то мож-

но обнаружить изменение его емкости. Этот факт легко наблюдается у сильных пьезоэлектриков, для слабых же, таких как кварц, изменение емкости невелико (около 1 %). К этому выводу легко прийти, приняв во внимание термодинамические соображения. Из теории пьезоэлектричества известно, что упругие коэффициенты пьезоэлектриков зависят от электрических условий, как и их коэффициенты диэлектрических проницаемостей зависят от механических условий. Это естественно, так как пьезоэлектричество по определению предполагает наличие связи между упругими и диэлектрическими свойствами. Поэтому описание пьезоэлектрических свойств материала невозможно без привлечения упругих и диэлектрических коэффициентов с указанием граничных механических и электрических условий.

Более полно пьезоэффект характеризует энергетический коэффициент κ , называемый коэффициентом электромеханической связи (ЭМС) и определяемый отношением $k = W_3 / W_0 = W_m / W_0$, где W_0 – вся приложенная к пьезоэлементу энергия, а W_3 и W_m – преобразованная (электрическая и механическая) энергия. Коэффициент ЭМС оказывается очень полезным для сравнения пьезоэлектриков, пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические коэффициенты которых могут существенно различаться. Этот коэффициент различен для статического и динамического режимов преобразования, в последнем случае он зависит также от вида и моды колебания. Коэффициент ЭМС, как и пьезоэлектрические модули, зависит от направления воздействующих сил относительно кристаллографических осей кристалла. Он определяет такую существенную характеристику резонатора, как относительная ширина резонансной кривой. Чем больше коэффициент ЭМС, тем больше относительная ширина резонансной кривой. Преобразование энергии пьезоэлектрическим элементом не может быть полным, поэтому коэффициент ЭМС не бывает больше 1. Для так называемых слабых пьезоэлектриков, к которым принадлежит кварц, коэффициент ЭМС не превышает нескольких процентов, для сильных пьезоэлектриков, таких как сегнетова соль или пьезокерамика, он может достигать 50–90 %.

Пьезоэлектрические датчики применяются для измерения давления, силы, ускорения. На рис. 5.18 показано устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя кварцевыми пластинами.

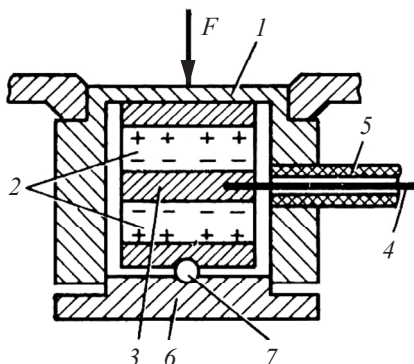


Рис. 5.18. Пьезоэлектрический датчик давления
(пояснения в тексте)

Измеряемое давление действует на мембрану 1, представляющую собой дно корпуса датчика. Кварцевые пластины 2 зажаты между металлическими прокладками 3. Средняя прокладка 3 соединена с выводом 4, проходящим через экранированную втулку 5 из изоляционного материала. Крышка 6 соединяется с корпусом и через шарик 7 передает давление пластинам, благодаря чему измеряемое давление распределяется по поверхности кварцевых пластин более равномерно. Кварцевые пластины обычно расположены таким образом, что в измерительную схему подается отрицательный потенциал. Положительный потенциал подается на корпус датчика. Для уменьшения утечки зарядов необходима очень качественная изоляция. С этой же целью поверхность кварцевых пластин тщательно полируют. Использование двух (а иногда и больше) пластин повышает выходную ЭДС, поскольку выходные сигналы пластин складываются.

На рис. 5.19 показан пьезоэлектрический датчик ускорения, используемый в виброизмерительной аппаратуре. Пьезоэлемент 1 из титаната бария расположен в корпусе прибора 2 между инерци-

онной массой 3 и подпятником 4. Для увеличения силы, действующей на пьезоэлемент при ускорениях, инерционная масса имеет относительно большие размеры и изготовлена из вольфрама. Пакет из инерционной массы 3, пьезоэлемента 1 и подпятника 4 прижат к основанию корпуса гайкой 5 через сферическую пяту 6, изоляционную прокладку, пружинную шайбу и контактную пластину. Вывод сигнала выполнен с помощью специального антивибрационного кабеля. Датчик измеряет ускорения от 0,2 до 200 g. Коэффициент преобразования порядка 8 мВ на 1 g. Минимальная частота виброускорений 5 Гц.

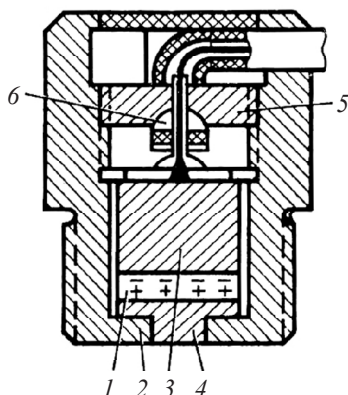


Рис. 5.19. Пьезоэлектрический датчик ускорения
(пояснения в тексте)

Чувствительность пьезодатчика и требования к измерительной цепи. Пьезоэлектрический датчик подобен электрическому конденсатору. Количество электричества q , появившееся под воздействием механической силы, заряжает грани пьезоэлемента и соединенные с ним проводники до напряжения U , определяемого как $U = q/C$, где C – емкость между проводниками (включая емкость пьезоэлемента). Чувствительность датчика определяется как приращение выходного напряжения, соответствующее изменению приложенной силы. При параллельном соединении n пластин их емкость складывается. Емкость одной пластины датчика толщиной d

и площадью s можно определить как емкость плоскопараллельного конденсатора.

Заряженный до напряжения U конденсатор будет разряжаться через сопротивление датчика R и сопротивление измерительной цепи. При практически реализуемых значениях сопротивления датчика R (десятки и сотни МОм) и его емкости C (десятки пФ) надо обеспечить очень большое входное сопротивление измерительной цепи. Для этого используются специальные электронные лампы, называемые электрометрическими. Электрометрические схемы могут обеспечить входное сопротивление измерительной цепи до 10^{13} Ом. Для увеличения постоянной времени разряда параллельно датчику иногда включают конденсатор. Применение измерительных цепей с очень большим входным сопротивлением позволяет снизить нижнюю границу частоты входных сигналов до нескольких герц.

При измерении высокочастотных (быстроизменяющихся) ударных нагрузок и ускорений пьезоэлектрические датчики имеют преимущество перед датчиками других типов.

5.2.4. Измерение напряжений и усилий в деталях машин

Измерение напряжений (местных деформаций)

при линейном и плоском напряженном состоянии

Для измерения напряжений (местных деформаций) при одноосном напряженном состоянии (одноосное растяжение или сжатие) рабочий датчик наклеивается в направлении главной деформации. Тогда величина напряжения будет равна:

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1, \quad (5.40)$$

где ε_1 – главная деформация, измеренная рабочим датчиком.

Погрешности в ориентации датчика не должны превышать 5° . При отклонениях, больших 5° , необходимо вводить поправки к величине тензочувствительности, формулы для вычисления которых приводятся в литературе [6, 9, 28]. Компенсационный датчик может быть наклеен на отдельную недеформированную пластину либо на поверхность исследуемой детали перпендикулярно направ-

лению действия нагрузки (чувствительность такой измерительной схемы будет в $(1 + \mu)$ раз выше, чем в том случае, когда компенсационный датчик наклеивается на ненагруженную пластину).

При плоском напряженном состоянии необходимо наклеивать на деталь розетку датчиков. Если направления главных деформаций известны, достаточно двух рабочих датчиков, расположенных под углом в 90° и наклеенных по этим направлениям (рис. 5.20, а).

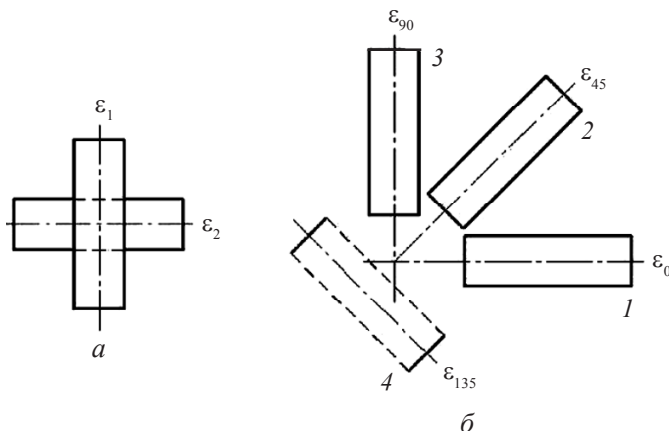


Рис. 5.20. Розетки рабочих датчиков:

а – при известных направлениях главных деформаций; б – направления главных деформаций не известны (пояснения в тексте)

Если направления главных деформаций неизвестны, в измерениях применяются равноугольные трехэлементные, или дельта-розетки, а также розетки, состоящие из четырех тензорезисторов (Т-дельта-розетки, веерные розетки и др.). При использовании розеток из четырех тензорезисторов четвертый тензорезистор позволяет проверить точность измерений: $\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} = \varepsilon_{45} + \varepsilon_{135}$, что свидетельствует о точности эксперимента.

Если деформации, измеренные рабочими датчиками 1, 2 и 3 (рис. 5.20, б), равны соответственно ε_0 , ε_{45} и ε_{90} , то главные деформации определяются по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\cos 2\alpha} \right); \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\cos 2\alpha} \right); \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\cos 2\alpha} \right); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2} \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\cos 2\alpha} \right); \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\text{где } \alpha = \arctg \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \right).$$

По известным главным деформациям ε_1 и ε_2 легко вычисляются главные нормальные напряжения:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1), \quad (5.43)$$

а также касательные напряжения:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{E}{2(1 + \mu)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2). \quad (5.44)$$

Измерение усилий по деформации элементов рабочей машины

Измерение усилий можно фиксировать через преобразование упругой деформации элементов детали в электрические величины, пропорциональные величине нагрузки, посредством датчиков, устанавливаемых на деталях машин.

Рассмотрим измерение усилий, возникающих в элементах рабочей клетки прокатного стана. При прокатке металла между вальками все элементы рабочей клетки под действием нагрузки испытывают деформации: растяжение, сжатие, изгиб или их комбинации. Если на этих элементах установить преобразователи – датчики, то по величине деформаций можно определить величину давления металла на валки. Однако не все элементы рабочей клетки пригод-

ны и удобны для установки преобразователей, поэтому на практике в качестве таких элементов используют станины и нажимные винты.

При одних и тех же нагрузках на рабочую клеть деформация станины всегда меньше деформации нажимных винтов. С этой точки зрения более удобно в качестве упругого элемента использовать нажимные винты, однако их использование связано с большими трудностями; нажимные винты вращаются, не обладают достаточной поверхностью для установки преобразователей и находятся под непрерывным воздействием смазки и других сред. По этим причинам нажимные винты используют главным образом на небольших станах. Станины рабочих клеток обычно имеют значительный запас прочности и поэтому испытывают малые упругие деформации. Станины удобно использовать для установки преобразователей, так как они лишены недостатков, присущих нажимным винтам. Деформация станины передается одновременно на все стойки, хотя и возможно неравномерное распределение деформации между стойками. Наиболее правильно устанавливать датчики на каждой стойке и суммировать их показания. Для упрощения измерений на практике используют две противоположные стойки обеих станин со стороны входа или выхода металла или стойки, расположенные по диагонали. Достижимая при этом точность часто оказывается вполне достаточной и составляет примерно $\pm 10\%$. При измерении давления с использованием деформации стоек станин используют главным образом два типа датчиков: индуктивные и сопротивления. Для грубых измерений иногда применяют рычажные системы [9].

Наиболее часто применяют преобразователи с датчиками сопротивления (рис. 5.21).

Силоизмеритель на датчиках сопротивления состоит из двух тяг 1, привариваемых к стойке. На концах тяг имеются головки с прорезями, служащими для размещения балочки 2, на которой наклеены активные датчики. Компенсационные датчики наклеивают на балочку 3; активные и компенсационные датчики соединяют в мост.

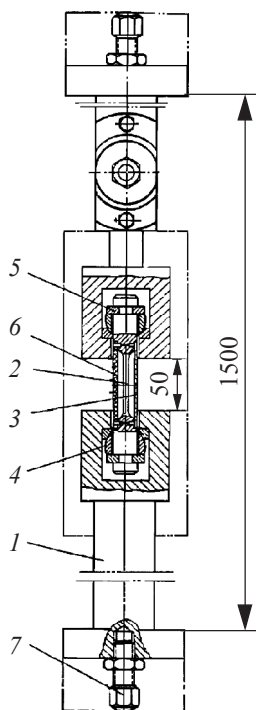


Рис. 5.21. Силоизмеритель с механическим коэффициентом усиления (пояснения в тексте)

Для устранения перекосов при монтаже и сохранения постоянного положения балочки 2 в работе на концах ее имеются шарниры в виде сферических пят 4, закрепленных разрезными кольцами 5. Монтаж проводов датчиков проводят на планке 6 из изоляционного материала. Предварительную установку производят болтами 7; точную установку балочки и постоянство натяга обеспечивают клиновым устройством. Для предохранения датчиков от воздействия агрессивных сред на тензометр надевают резиновый колпак, закрываемый стальным кожухом. Во время прокатки или тарировки происходит растяжение стойки станины, которое передается через тяги на балочку с датчиками. Последние испытывают деформацию, величина которой зависит от соотношения сечений тяг и балочки. В зависимости от величины этой деформации происходит изменение омического сопротивления датчиков

и возникает соответствующий разбаланс моста, который отмечается на приборе.

Тензометр на датчиках сопротивления отличается простотой и удобством установки. Так как тензометр располагают на поверхности стойки станины и на невысоком уровне, то не требуется остановки стана, которая необходима при установке месдоз под нажимные винты. К недостаткам таких тензометров относятся невысокая чувствительность и трудности, связанные с созданием постоянного натяжения. Расчет сечения балочки производится следующим образом. Удлинение стойки на участке L составит:

$$\Delta L = \frac{PL}{EF} = \frac{\sigma_{\text{ст}} L}{E}, \quad (5.45)$$

где P – усилие на одну стойку; L – длина (база) тензометра; $\sigma_{\text{ст}}$ – напряжение в стойке; F – площадь поперечного сечения стойки; E – модуль упругости материала стойки.

Удлинение L распределяется по элементам тензометра следующим образом:

$$\Delta L = \Delta l_1 + 2 \frac{l_2}{2} = \Delta l_1 + \Delta l_2, \quad (5.46)$$

где Δl_1 – удлинение балочки; Δl_2 – удлинение тяги.

Так как деформации элементов тензометра обратно пропорциональны их сечениям, то

$$\Delta L = \frac{\sigma_1 l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2 \sigma_1}{E} = \sigma_1 \frac{l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2}{E} = \frac{\sigma_{\text{ст}} L}{E}, \quad (5.47)$$

где σ_1 – напряжение в балочке; F_1 – площадь сечения балочки; F_2 – площадь сечения тяги.

Или

$$\sigma_1 \left(l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2 \right) = \sigma_{\text{ст}} L. \quad (5.48)$$

Проведя преобразования последнего выражения, получим:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{ст}}} = \frac{L}{l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2} = \frac{l_1 + l_2}{l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2} = k. \quad (5.49)$$

Коэффициент k называется коэффициентом механического усиления. С учетом выражения (5.49)

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{ст}} = \frac{l_1 + l_2}{l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2} = \frac{P}{F_{\text{ст}}} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1 + \frac{F_1}{F_2} l_2}. \quad (5.50)$$

Измерение давления металла на валки можно производить также по показаниям тензодатчиков, наклеиваемых на стойках станины рабочей клетки. В этом случае важным фактором является правильный выбор места для наклейки датчиков, где возникает максимальная деформация поверхностных волокон станины и известно напряженное состояние.

Под воздействием усилий наружные волокна станины находятся в различных условиях напряженного состояния. Так, напряжения на внутреннем волокне составляют при растяжении:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{P}{2F_{\text{ст}}} + \frac{M}{W_{\text{вн}}}; \quad (5.51)$$

на наружном волокне при растяжении или сжатии:

$$\sigma_{\text{нар}} = \frac{P}{2F_{\text{ст}}} - \frac{M}{W_{\text{нар}}}, \quad (5.52)$$

где P – давление металла на валки; $F_{\text{ст}}$ – площадь сечения стойки; M – изгибающий момент в стойке; $W_{\text{вн}}$, $W_{\text{нар}}$ – моменты сопротивления сечений по внутреннему и наружному волокнам.

Из выражений (5.51) и (5.52) видно, что для получения наибольшего сигнала выгоднее наклеивать датчики на внутренней стороне стойки. Для лучшей сохранности и удобства монтажа датчики

наклеивают несколько удаленно от плоскости, по которой перемещается подушка валька, или посередине стойки со стороны перевадки и привода.

Места для наклейки датчиков защищают пневматической зачистной машиной и тонкой наждачной бумагой, обезжиривают и очищают от грязи и пыли ацетоном. Провода, идущие непосредственно от датчиков, и кабель, подводимый к измерительной аппаратуре, крепят к небольшому кронштейну, приваренному к станине. Для защиты датчиков от механического повреждения и воздействия масла, пара и других агрессивных сред по контуру площадки накладывают резиновую рамку, которая прижимается металлической пластиной толщиной 2–3 мм и винтами. Рабочие датчики наклеивают параллельно вертикальной оси стойки, а компенсационные – перпендикулярно первым. Кроме основных датчиков, наклеивают также и резервные. На каждой стойке датчики соединяют в половину моста; вторую половину моста помещают в наружной схеме.

Тщательная наклейка датчиков на все стойки станины и хорошая защита этих датчиков от агрессивных сред позволяет достаточно точно производить измерение давления металла на валки. Однако применение этого метода ограничивается следующими недостатками:

1) необходимостью длительной остановки стана для наклейки и сушки датчиков (обычно 24 ч), что может быть выполнено только в дни капитального ремонта или случайных длительных остановок;

2) большой затратой времени на установку тарировочного комплекта и на процесс тарировки;

3) ненадежной защитой датчиков от механических повреждений и действия агрессивных сред;

4) малой величиной сигналов, вызванной обычно малыми деформациями стоек станины, что вызывает необходимость работы на высокочувствительных шлейфах и усилителях, мало приспособленных для использования в цеховых условиях, где имеются значительные вибрации.

Измерение усилий месдозами

Для измерения давлений в прокатных станах часто используют месдозы, устанавливаемые между нажимными винтами и подушками прокатного вала.

Применение месдоз для измерения усилий имеет ряд преимуществ: 1) высокая чувствительность; 2) большая точность; 3) месдозы можно предварительно протарировать на прессе и быстро устанавливать на стане.

Существующие месдозы в зависимости от типа чувствительного элемента можно разделить на следующие типы: гидравлические, угольные, емкостные, индуктивные, магнитоупругие и с датчиками сопротивления. Подробное описание месдоз приведено в литературе [9, 28].

В последнее время широкое распространение получили месдозы с датчиками сопротивления.

В зависимости от формы чувствительного элемента различают цилиндрические, столбчатые, кольцевые и мембранные месдозы.

К конструкции месдозы предъявляются требования прочности; жесткости; защиты чувствительного элемента от воздействия влаги, масла; чувствительности и линейности характеристики; показания месдозы не должны зависеть от неточности установки, перекосов, эксцентricности приложения нагрузки и должны обладать температурной компенсацией.

Для исключения погрешности измерения от неравномерности распределения удельных давлений и касательных напряжений на контактных поверхностях чувствительного элемента размеры чувствительного элемента, количество датчиков в измерительной схеме и схема их соединения должны удовлетворять определенным условиям.

На рис. 5.22 изображена месдоза с упругим цилиндрическим элементом 1, на котором наклеены тензодатчики сопротивления, которые соединены в мостовую схему.

К основанию упругого элемента крепят болтами стальной кожух 2, служащий для предохранения датчиков от механических повреждений и попадания различных сред. Герметизация месдозы

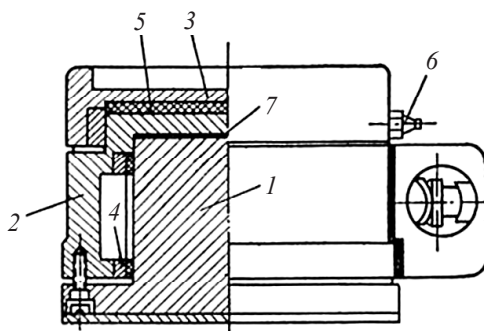


Рис. 5.22. Месдоза с цилиндрическим чувствительным элементом
(пояснения в тексте)

обеспечивается резиновым слоем и резиновой лентой, которая приклеивается к поверхности элемента. После сборки месдозы пространство между упругим элементом и кожухом заполняют специальным составом. На верхней поверхности кожуха помещен подпятник 3 из термически обработанной стали, несущий осевую и радиальную нагрузки. Радиальные нагрузки воспринимаются кольцом 4 из фосфористой бронзы, которое плотно закреплено в кожухе. Между подпятником и кожухом уложена прокладка 5 из антифрикционного высокопрочного сплава. Ниппель 6 служит для подводки смазки. Тонкая металлическая прокладка 7 обеспечивает хороший контакт между деталями 1 и 2.

Месдозы мембранного типа (рис. 5.23) применяют для измерения малых нагрузок.

Упругим измерительным элементом такой месдозы служит круглая пластина 1 с наклеенными на ней проволочными датчиками. Эта пластина опирается по контуру на корпус 2 и имеет отверстие в середине для вывода проводов от датчиков. Нагрузка на пластину передается диском 3 с цилиндрическим выступом диаметром d . Диск притянут к корпусу колпачковой гайкой 4. Наверху диск имеет сферическую поверхность, на которую установлен подпятник 5. Расчет параметров чувствительного элемента месдоз различных типов приведен в литературе [20].

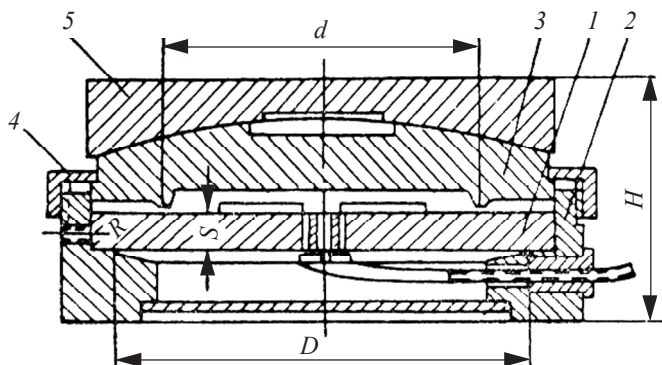


Рис. 5.23. Месдоза мембранного типа (пояснения в тексте)

В универсальной месдозе типа МУ совмещены измерительное и тарирующее устройства, что позволяет производить тарировку чувствительного элемента непосредственно на стане. Такая месдоза обеспечивает высокую точность измерений, удобную периодическую проверку показаний без снятия месдозы со стана и сохранение тех же контактных условий при измерениях и тарировке. Кроме того, в промышленных условиях не всегда возможно иметь для тарировки необходимый пресс, обладающий требуемой точностью. Это особенно затрудняет тарировку для месдоз, предназначенных для нагрузок выше 2 МН.

В универсальной месдозе на 15 МН (рис. 5.24) измерительное и тарирующее устройства расположены отдельно. Резиновое уплотнение 4 и прижимное Т-образное кольцо 5, притягиваемое винтами 6 к корпусу 2 и основанию 3, предохраняют датчики от попадания влаги и пыли. Датчики наклеиваются на наружную и внутреннюю стороны чувствительного элемента 1. Для удобства монтажа датчиков имеется панель 14. Шпонки 13 устраняют поворот корпуса. Относительно оси нажимного винта месдоза фиксируется гранями основания, которые входят в паз подушки.

При ограниченных габаритах по высоте устанавливается месдоза типа М, в которой отсутствует тарировочный домкрат. Конструкции универсальных месдоз типа МУ и М (рис. 5.25), входя-

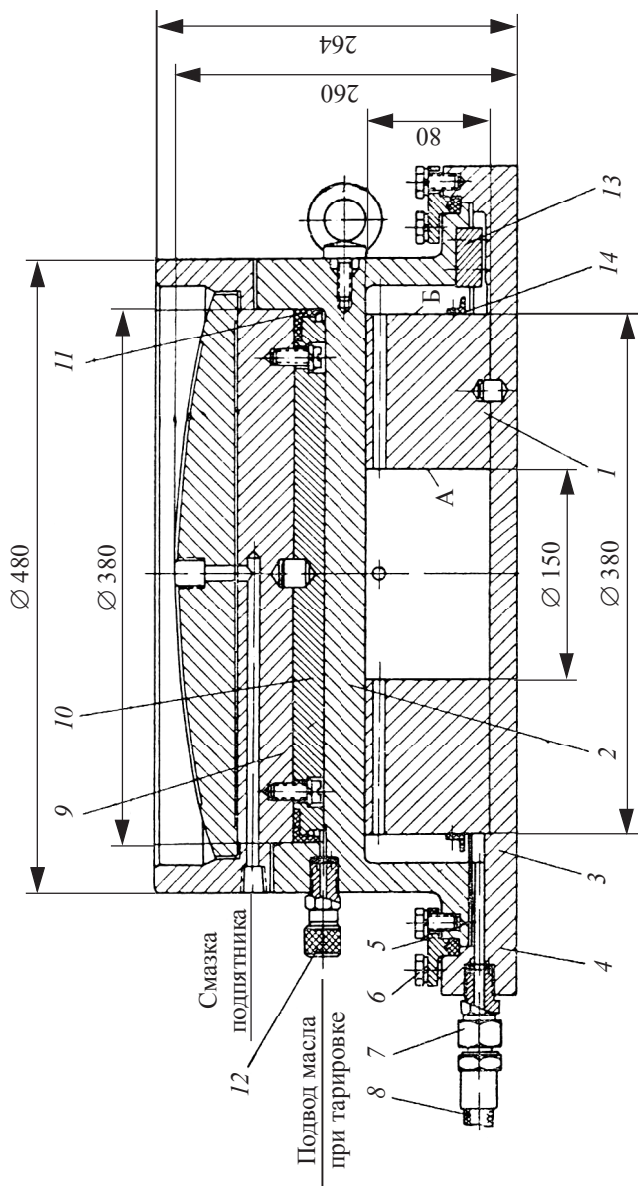


Рис. 5.24. Универсальная мессдоза на 15 МН
(пояснения в тексте)

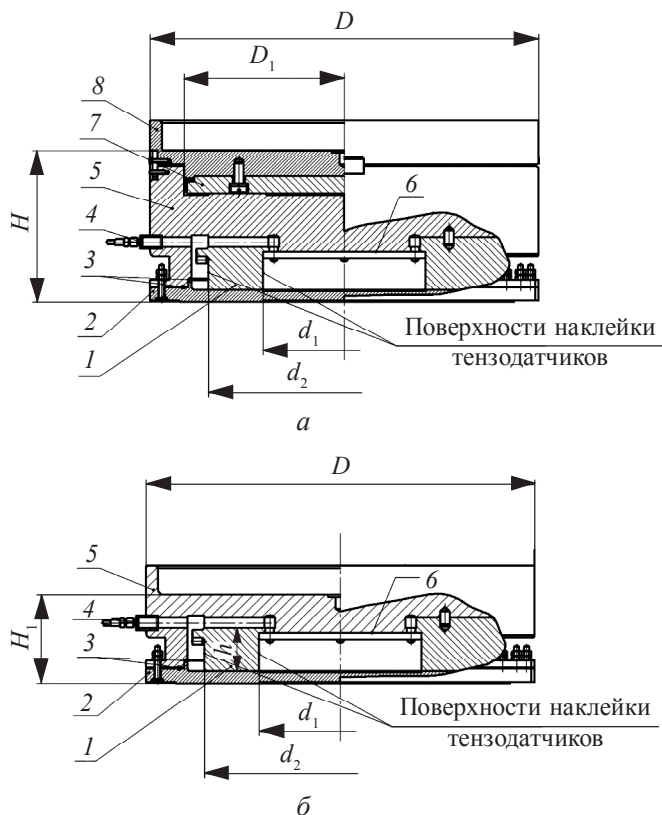


Рис. 5.25. Месдозы:

a – типа МУ; b – типа М;

1 – чувствительный элемент; 2 – основание; 3 – уплотнения; 4 – наконечник для вывода проводов; 5 – корпус; 6 – токосъемник; 7 – прижим; 8 – плунжер

щих в нормальный ряд, предназначены главным образом для станов холодной прокатки. В станах горячей прокатки, где температура нагрева месдозы доходит до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более, длительная эксплуатация стандартных датчиков сопротивления не обеспечивает необходимой точности и стабильности из-за возможного изменения характеристики клея или лака датчиков. По этой причине месдоза должна искусственно охлаждаться. Такие месдозы с искусственным

охлаждением чувствительного элемента называются МУО. У таких месдоз температура чувствительного элемента не превышает 40 °С.

Магнитоупругие месдозы основаны на изменении магнитной проницаемости ферромагнитных материалов под воздействием механических деформаций. Эти месдозы могут быть дроссельные (параметрические) и трансформаторные (генераторные датчики).

Чувствительный элемент в дроссельной месдозе (изготовленный из трансформаторного железа) представляет собой параллелепипед с двумя сквозными отверстиями для намотки катушки.

Нагрузка, приложенная к месдозе, вызывает уменьшение магнитной проницаемости материала, вследствие чего уменьшается индуктивное сопротивление обмотки. Это приводит к изменению тока в обмотке.

Чувствительный элемент в трансформаторной магнитоупругой месдозе также представляет собой параллелепипед, набранный из пластин трансформаторной стали, по диагоналям которого просверлены четыре отверстия (рис. 5.26). Через отверстия намотаны две обмотки, плоскости обмоток наклонены под углом 45° к направлению приложения измеряемой нагрузки.

Принцип действия такой месдозы состоит в том, что протекающий в первичной обмотке ток создает в магнитопроводе потоки Φ_1 и Φ_2 , которые замыкаются вокруг витков первичной обмотки и не пересекают плоскость вторичной обмотки. При нагружении месдозы магнитная проницаемость в направлении действия силы уменьшается, в результате чего потоки Φ'_1 и Φ'_2 первичной обмотки начинают пересекать плоскость вторичной обмотки, наводя в ней электродвижущую силу, тем большую, чем больше приложена нагрузка к месдозе.

Рабочие элементы этих месдоз выполняются наборными или литыми из трансформаторной стали с большим содержанием кремния.

Основным преимуществом магнитоупругих месдоз является высокая надежность в работе; точность измерения нагрузок этими месдозами достигает 1–2 %. Поэтому трансформаторные месдозы применяются для стационарного контроля полного давления металла на валки.

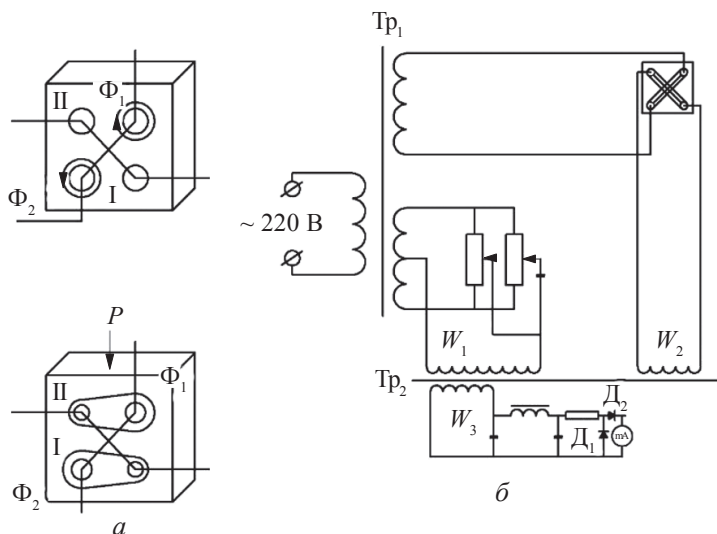


Рис. 5.26. Чувствительный элемент (а) и схема соединения магнитоупругой мездозы (б) трансформаторного типа

Определение давления при измерении нагрузки на одном нажимном винте производится по формуле (рис. 5.27):

$$P = P_2 \frac{L}{l}, \quad (5.53)$$

где P – полное давление прокатки; P_2 – измеренная мездозой нагрузка на нажимной винт; L – расстояние между осями нажимных винтов; l – расстояние от точки приложения равнодействующей полного давления на валок до оси противоположного нажимного винта.

Полное усилие при измерении двумя мездозами можно получить с помощью схемы, суммирующей показания мездоз. Это облегчает и ускоряет расшифровку осциллограмм, точность определения усилия при этом выше, чем при раздельной записи давлений правой и левой мездоз.

При работе по безусилительной схеме мездозы соединяются последовательно (рис. 5.28). При этом выходной сигнал получается суммированием выходных напряжений мостов мездоз.

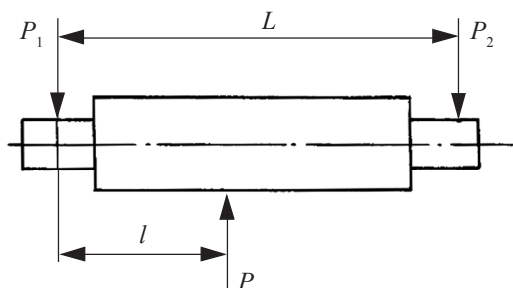


Рис. 5.27. Схема сил, действующих на валок

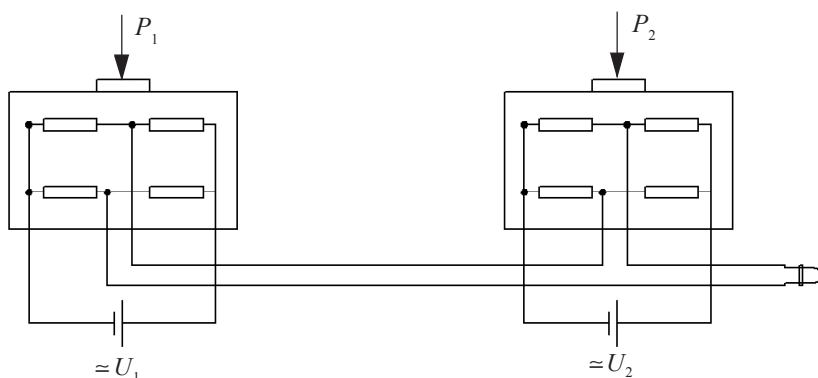


Рис. 5.28. Схема питания мостов мездоз при суммировании их выходных сигналов (последовательное соединение)

При работе с тензоусилителем полумосты мездоз соединяют параллельно одним кабелем ко входу тензоусилителя (рис. 5.29).

При параллельном соединении достичь независимости показаний от точки приложения равнодействующей можно только при равенстве чувствительности мездоз. Практически чувствительности мездоз различны, что вносит погрешности в результаты замеров.

Величина погрешности может быть рассчитана при известной чувствительности мездоз [6].

Тарировка мездоз обычно производится на прессах класса точности 0,5–1 %, реже – непосредственно на стане с помощью гидравлического домкрата, установленного между валками.

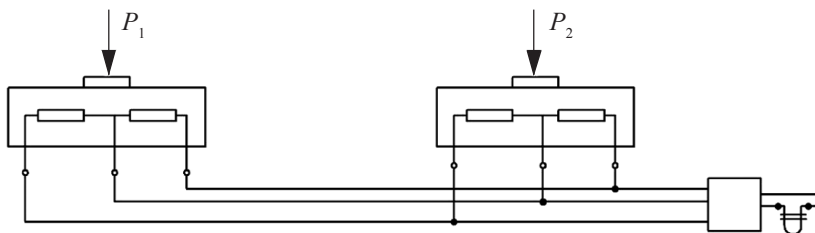


Рис. 5.29. Соединение полумостов мсдоз при суммировании их выходных сигналов (параллельное соединение)

Тарировка на стане является более точной, чем на прессе, так как она производится в рабочих условиях, соответствующих условиям замеров. Однако осуществить ее в производственных условиях не всегда удастся ввиду малого времени остановки стана.

При тарировке на гидравлическом прессе мсдозу устанавливают со всеми вспомогательными деталями, участвующими в передаче измеряемого усилия.

Тарировка заключается в ступенчатом нагружении и записи отклонения, соответствующего каждой ступени нагружения и разгружения. Такой цикл нагружения и разгружения повторяется не менее трех раз, причем желательно иметь не менее пяти ступеней нагружения и разгружения по всему измеряемому диапазону от нуля до максимальной нагрузки.

Результаты тарировки заносят в таблицу (см., например, табл. 5.4).

По результатам замеров строят тарировочный график (рис. 5.30).

Измерение крутящего момента

Для анализа работы металлургических машин, загруженности и прочности их рабочих органов, деталей и узлов необходимо также знать крутящие моменты, действующие на детали (валы) машин при их работе. Как правило, эти моменты переменны во времени. Поэтому в процессе их измерений производится непрерывная запись результатов измерений на осциллограмму.

Для таких измерений обычно применяют электротензометрические измерительные установки. В этих установках воспринимающими устройствами являются тензодатчики сопротивления

Т а б л и ц а 5.4

**Тарировочные данные гальванометра для записи давления
(гальванометр: тип..., №, дата тарировки)**

Усилие тарирования P , %	Отклонение светового пятна, мм						Среднее значение
	Нагру- жение	Разгруз- ка	Нагру- жение	Разгруз- ка	Нагру- жение	Разгруз- ка	
0,25							
0,50							
0,75							
1,0							
1,2							

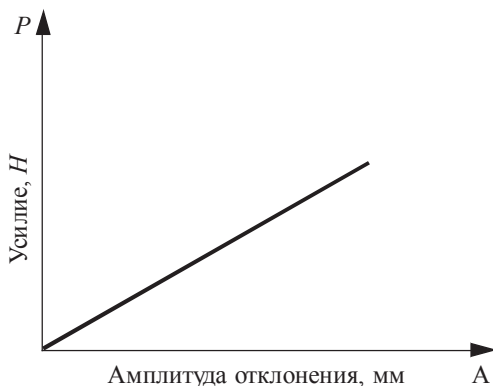


Рис. 5.30. Тарировочный график гальванометра
при осциллографировании усилия

(проволочные и фольговые), пьезодатчики, установленные на поверхности нагружаемой моментом детали (валу). Регистрирующие устройства накапливают информацию по изменению крутящего момента во времени.

Полученные осциллограммы позволяют определить в любой момент времени как величины крутящих моментов, так и характер

их изменения. Такие данные позволяют полнее оценивать силовой режим работы машины в целом.

Применяемые в настоящее время устройства для непосредственного измерения крутящего момента весьма разнообразны по принципу работы и конструктивному исполнению.

Широкое распространение получила многочисленная группа электрических преобразователей крутящего момента. Эти преобразователи основаны на фиксации упругой деформации вала, возникающей под действием приложенного момента. В зависимости от типа чувствительного элемента они подразделяются на индуктивные, емкостные, струнные, бесконтактные датчики сопротивления.

Наибольшее распространение при измерении крутящего момента получили датчики сопротивления, которые имеют большие преимущества по сравнению с другими способами регистрации крутящего момента, особенно при исследовании в производственных условиях.

В схемах для измерения крутящего момента с помощью проволочных датчиков имеются следующие элементы:

- датчики, наклеенные на теле вала, и соединительные провода;
- токосъемное устройство;
- провода от токосъемных колец до усилителя или осциллографа;
- измерительная схема;
- измерительный и регистрирующий прибор.

Датчики наклеиваются под углом 45° к горизонтальной оси вала. На валу наклеиваются два или четыре датчика, которые образуют мостовую или полумостовую схему.

Применение датчиков связано с использованием токов малой величины, которые даже после усиления специальными приборами не превышают 50–100 А. Поэтому величина переходных сопротивлений, возникающих в месте контакта с вращающимися кольцами токосъемника, оказывает значительное влияние на измерения. Переходные сопротивления должны быть постоянными и малыми по величине. Поэтому качеству контакта уделяется большое внимание, а сопротивление датчиков желательно иметь как можно больше. Конструкция токосъемников зависит от условий его работы и широко описана в литературе.

При наличии биения и при перемещении вала часто применяется струнный токосъемник.

Тарирование гальванометра при записи крутящего момента наиболее просто выполнить непосредственным нагружением вала крутящим моментом. Этот способ тарирования применим для валов малого диаметра при передаче сравнительно небольших крутящих моментов.

При невозможности применения непосредственной тарировки ее осуществляют на крутильной машине или тарировочной балке.

При тарировке воспроизводят электрическую схему, эквивалентную схеме при измерениях. Датчики, наклеенные на образец или тарировочную балку из той же партии, что и при измерениях, нагружают крутящим моментом или грузами.

Тарировка выполняется при ступенчатом увеличении прикладываемой нагрузки с записью величины амплитуды отклонения при нагружении и разгрузке образца. Число нагружений и разгрузок должно быть не менее трех. Желательно иметь не менее пяти ступеней нагружения при каждой тарировке.

Результаты тарировки заносят в таблицу и строят график, подобный графику тарировки месдоз. При тарировке на крутильной машине величина крутящего момента на рабочем валу, соответствующего крутящему моменту тарировки, определяется по формуле

$$M = M_T \left(\frac{D}{d} \right)^3 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.54)$$

где M – момент на рабочем валу, соответствующий моменту тарировки, Н · м; M_T – момент тарировки, Н · м; D – диаметр рабочего вала; d – диаметр рабочего образца, м.

При отсутствии крутильной машины тарирование выполняют на тарировочной балке.

Связь между нормальными напряжениями в балке σ и касательными напряжениями вала τ_{\max} определяется условием

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{1 + \mu}, \text{ МПа,} \quad (5.55)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Однако исследованиями доказано, что зависимость (5.55) не соответствует действительной разности между τ_{\max} и σ .

Фактически для проволочных датчиков τ_{\max} меньше σ на 5–10 %.

При линейной чувствительности материала проволоки тензодатчика $S = 2,1 \tau_{\max} = 0,905 \sigma$, МПа.

Тогда величина крутящего момента на рабочем валу определяется зависимостью

$$M = \tau_{\max} W_p \cong 0,19 \cdot 10^{-6} D^3 \sigma, \text{ Н} \cdot \text{м,} \quad (5.56)$$

где $W_p = \frac{\pi D^3}{16}$ – полярный момент сопротивления сечения рабочего вала, м³.

Учитывая, что на величину касательных напряжений при тарировке на балке влияет чувствительность тензодатчика, предпочтительной схемой тарировки крутящего момента (для датчиков с коэффициентом тензочувствительности $K \neq 2$, например, фольговых) следует считать тарировку на крутильной машине.

Измерение рабочих параметров приводов металлургических машин

Электрические параметры металлургических машин. В качестве привода металлургических машин применяются электродвигатели постоянного и переменного тока.

О работе металлургической машины и нагрузках на ее детали можно получить достаточно достоверные данные. Для этого требуется во время работы машины измерить и записать на осциллограмму электрические параметры ее привода, а именно: ток двигателя, напряжения на клеммах якоря, ток возбуждения, в частности, для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, мощность, развиваемую двигателем, частоту вращения двигателя.

По полученным при эксперименте осциллограммам с указанными электрическими параметрами работы машины можно определить в любой момент времени:

- электромеханический момент, развиваемый двигателем;
- мощность, развиваемую двигателем;
- ускорение, замедление и скорость вращения двигателя и, следовательно, ускорение, замедление и скорость движения рабочих органов и других деталей машины.

Кроме того, можно определить:

- моменты приложения, время действия и моменты снятия технологических нагрузок, действующих на машину;
- величины этих технологических нагрузок, характер их действия;
- машинное время работы машины в различные периоды;
- время пауз (остановок) в работе машины;
- полное время цикла работы машины;
- расход энергии по периодам и в целом за цикл работы машины и т. д.

Все эти данные дают достаточно полное представление о режиме работы машины в целом и воспринимаемых ею и ее деталями нагрузках.

Для определения крутящего момента существует два основных метода:

- 1) измерение энергетических параметров двигателя машины или механизма;
- 2) непосредственное измерение величины крутящего момента специальными приборами.

Измерение силы тока якоря электродвигателя. Определение силы тока якоря двигателя бывает необходимо для определения расчетом электромеханического момента, развиваемого двигателем, перегрузки двигателя по току и моменту, загрузки двигателя по среднеквадратичному току (нагреву), мощности (при замеренном напряжении на клеммах двигателя), развиваемой двигателем, и т. д.

Измерение силы тока по якорю двигателя для двигателей постоянного и переменного тока производится по-разному.

Измерение силы постоянного тока. Принципиальная схема включения гальванометра для записи силы постоянного тока якоря электродвигателя приведена на рис. 5.31. Гальванометр *1* осциллографа через переменное сопротивление *2* или непосредственно соединительными проводами подключается к шунту *3*, включенному в цепь якоря.

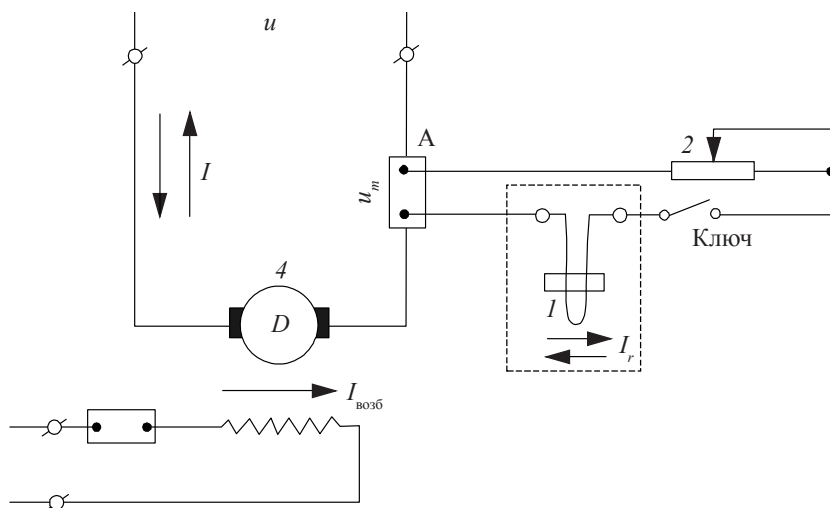


Рис. 5.31. Принципиальная схема включения гальванометра осциллографа для записи силы постоянного тока (пояснения в тексте)

Шунт применяется для расширения предела измерения тока измерительного механизма. Он представляет собой измерительный преобразователь, состоящий из резистора, включаемого в цепь измеряемого тока, параллельно которому присоединяется измерительный механизм (рис. 5.32). Для устранения влияния сопротивлений контактных соединений шунты снабжаются токовыми и потенциальными зажимами.

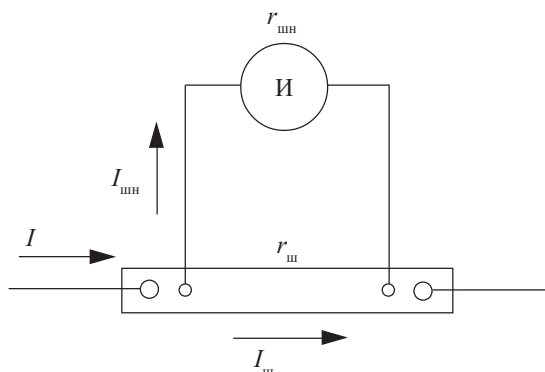


Рис. 5.32. Схема включения шунта в измерительную схему

Измеряемый ток цепи I и ток измерительного механизма I_u одной из параллельных ветвей связаны соотношением

$$I_u = \frac{I \cdot r_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}} + r_u}. \quad (5.57)$$

Максимально возможная величина напряжения на клеммах шунта определяется по номинальному напряжению шунта $u_{\text{шн}}$ и его максимальной загрузке I_{max} . Шунт для осциллографической схемы является источником постоянного тока, напряжение которого зависит от силы тока I , протекающего через него. Электрические параметры шунта указаны на нем. Так, например, параметры 500 А – 45 мВ, обозначенные на шунте, означают, что при прохождении тока $I = 500$ А на зажимах шунта возникает разность потенциалов $u_{\text{ш}} = 45$ мВ (рис. 5.33).

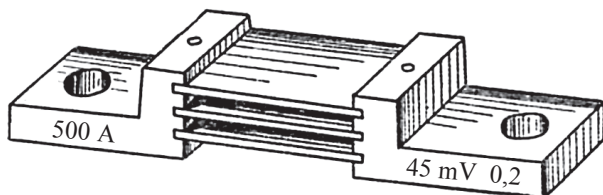


Рис. 5.33. Общий вид шунта

Для записи постоянного тока можно использовать гальванометры высокой или средней чувствительности. Гальванометры низкой чувствительности обычно не могут быть применены ввиду малого напряжения $u_{\text{ш}}$ на зажимах шунта.

Минимально необходимая величина переменного сопротивления определяется по формуле

$$R_2 = \frac{u_{\text{ш}} - I_{\Gamma} R_{\Gamma}}{I_{\Gamma}} = \frac{I_{\text{max}} \frac{u_{\text{шн}}}{I_{\text{шн}}}}{I_{\Gamma}} - R_{\Gamma}, \text{ Ом}, \quad (5.58)$$

где $u_{\text{ш}}$ – максимально возможная величина напряжения на клеммах шунта, В; I_{Γ} – ток, проходящий через гальванометр, меньше его максимально допустимой (для принятого типа гальванометра) величины, А; I_{max} – максимальный ток силовой цепи, т. е. ток якоря двигателя, А; $u_{\text{шн}}$ – номинальное напряжение шунта, В; $I_{\text{шн}}$ – номинальный ток шунта, А; R_{Γ} – сопротивление гальванометра, Ом.

Величина необходимого тока, проходящего через гальванометр, определяется в зависимости от максимально допустимой на осциллограмме амплитуды отклонения указателя гальванометра и его чувствительности:

$$I_{\Gamma} = \frac{l}{k}, \quad (5.59)$$

где l – принятая амплитуда отклонения указателя гальванометра, мм; k – чувствительность гальванометра, отнесенная к оптическому плечу осциллографа, мм/А.

При расчете отклонения амплитуды указателя гальванометра необходимо учитывать тип привода. При реверсивном приводе указатель гальванометра будет отклоняться на осциллограмме в одну сторону от нулевого положения.

Измерительная часть схемы отключается от шунта и подсоединяется по схеме, представленной на рис. 5.34. Источником питания при тарировке гальванометра по этой схеме может быть любой источник постоянного тока I . Тарировка гальванометра производится перед началом и после окончания исследования. При этом

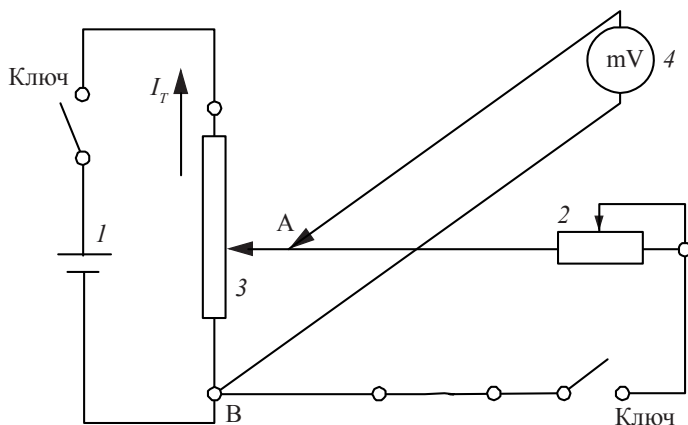


Рис. 5.34. Схема включения приборов при тарировке гальванометра осциллографом для записи постоянного тока (пояснения в тексте)

сохраняется неизменной измерительная схема между контактами на шунте А и В, которые переносятся на тарировочное сопротивление 3 (с регулируемым сопротивлением 2).

Тарировка производится в следующем порядке. Последовательно тарировочным сопротивлением 3 устанавливаются по милливольтметру 4 несколько уровней значения напряжения на клеммах А и В измерительной цепи, т. е. напряжение на шунте $u_{\text{ш}}$. Каждому из этих значений $u_{\text{ш}}$ соответствует определенный уровень значения силы тока I_i , определяемый по формуле

$$I_i = I_{\text{шн}} \frac{u_{\text{ш}i}}{u_{\text{шн}}}. \quad (5.60)$$

При каждом уровне $u_{\text{ш}}$ включается осциллограф и дается короткая запись осциллограммы с I_i . В результате на тарировочной осциллограмме получится соответственно I ступеней отклонения светового «зайчика» l_i , мм.

Результаты тарировки записывают в табл. 5.5, и по ее данным строят тарировочный график (см. рис. 5.30).

**Тарировочные данные гальванометра
при записи постоянного тока**

Напряжение по вольтметру высокой точности $u_{ш}, \text{ мВ}$	Соответ- ствующая сила тока $I, \text{ А}$	Отклонение светового пятна на тарировочной осциллограмме $l, \text{ мм}$			
		Первое измерение	Второе измерение	Третье измерение	Среднее значение
$u_{ш1} = 0,5u_{ш}$	$I_1 =$				$l_1 =$
$u_{ш2} = 1,0u_{ш}$	$I_2 =$				$l_2 =$
$u_{ш3} = 1,5u_{ш}$	$I_3 =$				$l_3 =$
$u_{ш4} = 2,0u_{ш}$	$I_4 =$				$l_4 =$
$u_{ш5} = 2,5u_{ш}$	$I_5 =$				$l_5 =$

Масштаб тока определяется тангенсом угла наклона тарировочного графика к оси абсцисс:

$$M_I = \frac{I}{l}, \text{ А/мм.} \quad (5.61)$$

Полученный в результате тарировки масштаб M_I позволит обрабатывать токовую кривую на осциллограмме работы двигателя.

Измерение силы постоянного тока обмотки возбуждения электродвигателя. Для записи силы постоянного тока $I_{\text{возб}}$ в цепи обмотки возбуждения электродвигателя применяется измерительная схема включения гальванометра осциллографа, аналогичная описанной выше для записи силы постоянного тока якоря электродвигателя. В этом случае измерительная схема подключается к шунту, встроенному в цепь обмотки возбуждения электродвигателя. Тарировка гальванометра для записи $I_{\text{возб}}$ производится так же, как и описанная выше тарировка гальванометра для записи I . Кривая тока возбуждения двигателя для механизма позиционного действия имеет вид, показанный на рис. 5.35.

Для записи силы постоянного тока $I_{\text{возб}}$ в цепи обмотки возбуждения электродвигателя применяется измерительная схема вклю-

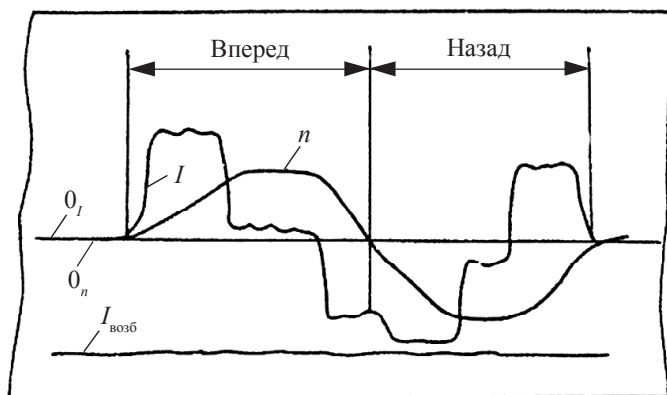


Рис. 5.35. Осциллограмма кривой записи тока якоря I и тока возбуждения $I_{\text{возб}}$ двигателя постоянного тока при реверсивной работе механизма

чения гальванометра осциллографа, аналогичная описанной выше для записи силы постоянного тока якоря электродвигателя. В этом случае измерительная схема подключается к шунту, встроенному в цепь обмотки возбуждения электродвигателя. Тарировка гальванометра для записи $I_{\text{возб}}$ производится так же, как и описанная выше тарировка гальванометра для записи I . Полученный в результате тарировки масштаб $M_{I_{\text{возб}}}$ позволяет обрабатывать кривую тока возбуждения двигателя при его работе.

Измерение силы переменного тока электродвигателя. Осциллографирование переменного тока несколько сложнее, чем постоянного, так как требуются дополнительно трансформатор тока, выпрямители и другие приборы. При осциллографировании силы переменного тока могут быть использованы гальванометры любого типа, рабочая частота которых не менее 50 Гц. При проведении исследования, независимо от мощности двигателя, лучше включать в цепь измерительный трансформатор тока с широким применением коэффициента трансформации (рис. 5.36).

По схеме (рис. 5.36, а) гальванометр I осциллографа присоединен через регулировочное сопротивление 2 к постоянной нагрузке (сопротивлению 3), включенной в цепь вторичной обмотки измери-

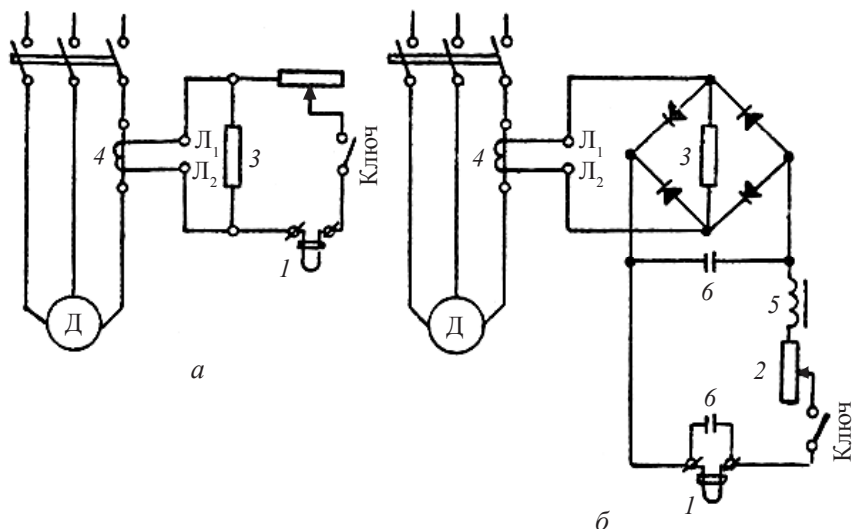


Рис. 5.36. Схема включения гальванометров осциллографа для записи силы переменного тока (пояснения в тексте):

а – без выпрямителя; *б* – с выпрямителем

тельного трансформатора тока 4. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь одной из фаз электродвигателя. Гальванометр осциллографа записывает синусоидальные колебания силы тока I_T , как показано на рис. 5.37, *а*, огибающая которых характеризует изменения тока I_T , т. е. и силы тока I_p , потребляемого двигателем.

При осциллографировании нескольких параметров обработка такой осциллограммы затруднена, так как поле осциллограммы затемнено поперечными линиями от указателя гальванометра с частотой, равной частоте переменного тока. Поэтому в некоторых случаях применяют схему включения гальванометра с выпрямителем (рис. 5.36, *б*). Здесь также специальное нагрузочное сопротивление 3 включают во вторичную цепь трансформатора тока 4, гальванометр 1 подсоединяют через регулировочное сопротивление 2 к выпрямителю, собранному по мостовой схеме. Индуктивность 5 и емкость 6 служат для сглаживания пульсаций выпрямительного тока. Величина емкости подбирается при настройке аппаратуры.

Осциллограмма тока, записанная по схеме рис. 5.36, б, имеет чистое поле с небольшой пульсацией линий тока (рис. 5.37, б).

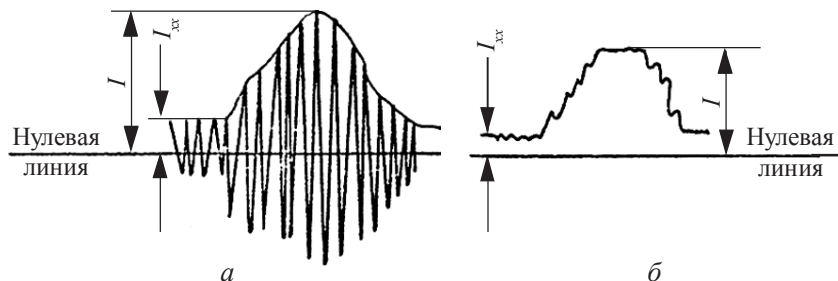


Рис. 5.37. Вид осциллограмм записи силы переменного тока:
а – без выпрямителя; б – с выпрямителем

Тарировка гальванометра для записи силы переменного тока заключается в подаче по проводникам А и В измерительной схемы регулируемого переменного тарировочного тока I_T .

Схема для осуществления тарировки, представленная на рис. 5.38, включает понижающий трансформатор I , которым создаются ступени тока при тарировке, и контрольный амперметр $З$ для определения величины тарировочного тока I_T в измерительной цепи. Это тарировочный ток вторичной обмотки трансформатора тока, вызывающего соответствующий ток I_T в гальванометре осциллографа.

Для каждой ступени тарировочного тока I_{Ti} (соответствует току вторичной обмотки трансформатора тока) можно определить соответствующее значение тока первичной цепи трансформатора тока I_i по формуле

$$I_i = I_{Ti} \frac{I_{\Pi}}{I_B} = I_{Ti} K_I, \text{ А}, \quad (5.62)$$

где I_{Ti} – величина тарировочного тока, измеренная образцовым амперметром $З$; I_{Π} – ток первичной цепи измерительного трансформатора тока (по паспорту трансформатора); I_B – ток вторичной цепи измерительного трансформатора тока (по паспорту трансфор-

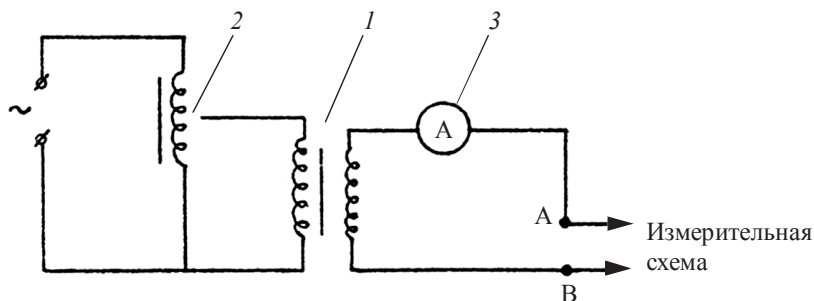


Рис. 5.38. Схема включения приборов при тарировке гальванометра осциллографа для записи силы переменного тока (пояснения в тексте)

матора); I_i – ток электродвигателя, соответствующий тарировочному току; K_I – коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

Результаты тарировочных измерений заносят в табл. 5.6 и по ее данным строят тарировочный график, аналогичный представленному на рис. 5.30, по которому и определяют масштаб тока:

$$M_I = \frac{I}{l}, \frac{\text{А}}{\text{мм}}. \quad (5.63)$$

Т а б л и ц а 5.6

**Тарировочные данные гальванометра
при записи силы переменного тока**

Сила тарировочного тока по образцовому амперметру $I_{Tr}, \text{А}$	Соответствующая сила тока $I_p, \text{А}$	Отклонение светового пятна на тарировочной осциллограмме $l_p, \text{мм}$			
		Первое измерение	Второе измерение	Третье измерение	Среднее значение
I_{T1}	$I_1 =$				$l_1 =$
I_{T2}	$I_2 =$				$l_2 =$
I_{T3}	$I_3 =$				$l_3 =$
I_{T4}	$I_4 =$				$l_4 =$
I_{T5}	$I_5 =$				$l_5 =$

Трансформатор тока подбирается по рабочему току электродвигателя, определяемому по щитовым приборам, или по номинальному току с учетом перегрузки электродвигателя по току $\lambda = 1,75-2,0$.

Измерение напряжений на клеммах электродвигателей постоянного и переменного тока. Осциллографирование напряжения выполняется в том случае, когда регулирование скоростного режима двигателя, т. е. и машины, осуществляется изменением напряжения питания электродвигателя. Если напряжение постоянно и не изменяется, оно, как правило, не осциллографируется, так как в этом случае изменением напряжения в связи с увеличением нагрузки можно пренебречь. Это справедливо для двигателей и постоянного и переменного тока.

Для осциллографирования напряжений двигателей постоянного и переменного тока могут применяться гальванометры любой чувствительности. В зависимости от типа гальванометра подбирается дополнительное сопротивление.

В схеме (рис. 5.39, а) напряжение на клеммах А и В электродвигателя замыкается на дополнительное большое сопротивление 3–5. Гальванометр осциллографа 1 включается через дополнительно регулируемое сопротивление 2.

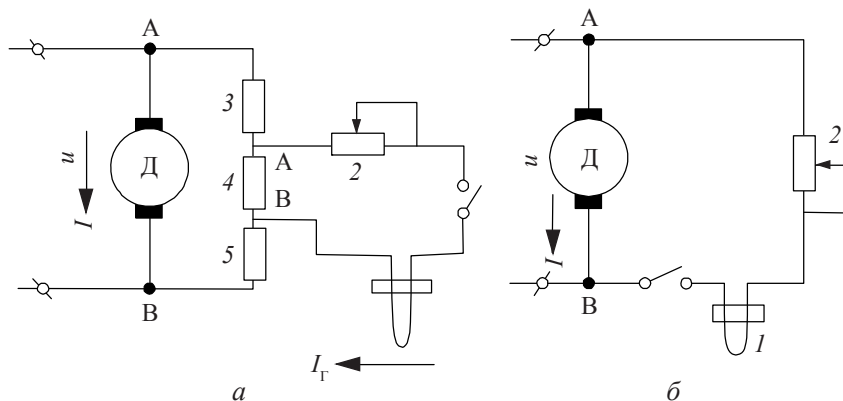


Рис. 5.39. Схема включения приборов для записи напряжения на клеммах двигателя постоянного тока (пояснения в тексте):

- а – с дополнительным большим сопротивлением;
- б – без дополнительного сопротивления

В схеме на рис. 5.39, б гальванометр I через дополнительное регулируемое сопротивление 2 подключен к клеммам А и В электродвигателя. Предпочтительной по условиям техники безопасности является схема, представленная на рис. 5.39, а.

Величина дополнительного сопротивления, включенного последовательно в цепь гальванометра, определяется по формуле

$$R_2 = \frac{u_{AB} - I_{\Gamma} R_{\Gamma}}{I_{\Gamma}}, \text{ Ом}, \quad (5.64)$$

где u_{AB} – напряжение на клеммах А и В.

Падение напряжения на клеммах гальванометра незначительно по сравнению с u_{AB} , и для расчета добавочного сопротивления можно пользоваться упрощенной формулой $R_{\Gamma} = u_{AB} / I_{\Gamma}$. При сборке схемы добавочное сопротивление принимают больше расчетного и окончательно подбирают при настройке аппаратуры во время работы двигателя (по отклонению светового пятна на экране осциллографа).

При выборе тока гальванометра I_{Γ} и амплитуды отклонения светового пятна на экране осциллографа учитывается тип привода. При реверсивной работе расположение нулевого положения «зайчика» гальванометра выбирается с расчетом на изменение направления отклонения светового пятна в различные стороны от нулевой линии. Амплитуда отклонения в этом случае принимается в два раза меньше, чем при реверсивном приводе.

При нереверсивной работе машины нулевое положение светового пятна можно принять у края экрана осциллографа.

Тарирование гальванометра при записи напряжения выполняется по схеме, представленной на рис. 5.40.

К источнику со стабильным напряжением, большим или равным максимальному напряжению двигателя, подключается потенциометр 6. С него на клеммы А и В измерительной схемы подается несколько ступеней напряжения, измеряемого вольтметром 7, и записываются тарировочные осциллограммы, по которым определяются соответствующие отклонения «зайчика» гальванометра.

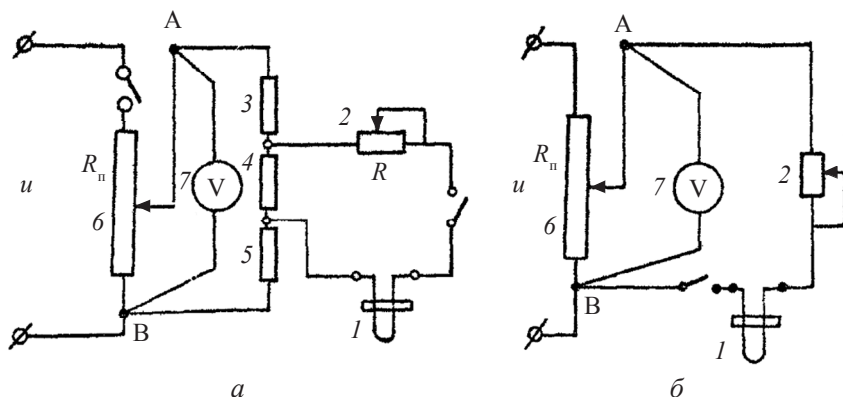


Рис. 5.40. Схема включения приборов при тарировке гальванометров осциллографа для записи напряжения на клеммах двигателя постоянного тока по схемам рис. 5.39 (пояснения в тексте)

Результаты замеров вносятся в табл. 5.7, и по ним строится тарировочный график, приведенный на рис. 5.30, по которому и определяется масштаб напряжения:

$$M_U = \frac{U}{l}, \text{ В/мм.} \quad (5.65)$$

Т а б л и ц а 5.7

Тарировочные данные гальванометра для записи напряжений

Напряжение по образцовому вольтметру u_p , В	Отклонение светового пятна на тарировочной осциллограмме l_p , мм			
	Первое измерение	Второе измерение	Третье измерение	Среднее значение
$u_1 = 0,2u_H$				$l_1 =$
$u_2 = 0,4u_H$				$l_2 =$
$u_3 = 0,6u_H$				$l_3 =$
$u_4 = 0,8u_H$				$l_4 =$
$u_5 = 1,0u_H$				$l_5 =$

При отсутствии стабильного высокого напряжения тарифовочный график строится по результатам одного замера напряжения. При этом полученную на тарифовочном графике точку соединяют с нулевой.

Гидравлические параметры машин

Методика измерения давлений в текучих средах. Датчики давления используются в основном для измерения давления в жидких или газообразных средах. Общее название для этих двух сред – текучие среды – подчеркивает малое сопротивление их деформации (в отличие от твердых тел).

Давление в текучей среде может быть определено как мера силы, приходящейся на единицу площади, передаваемой текучей средой, в направлении, перпендикулярном любой поверхности, входящей с ней в контакт. Текучей средой может быть или газ или жидкость. Стандартная единица для измерения давления в системе СИ – паскаль (Па), равен силе в один ньютон, приложенной на один квадратный метр (Н/м^2). Чаще применяется более крупная единица – килопаскаль (кПа), равная 1 000 Па. В английской системе единиц давление обычно выражается в фунтах на квадратный дюйм (psi). Давление может быть выражено и в некоторых других единицах, включая высоту ртутного или водяного столба (табл. 5.8).

Имеется три различных вида давления: абсолютное давление, относительное давление и дифференциальное давление. **А б с о л ю т н о е д а в л е н и е** – это абсолютное значение силы, отнесенное к единице поверхности. Поэтому абсолютное давление – это разность между давлением в данной точке среды и абсолютным нулем давления, соответствующим давлению в совершенном вакууме. **О т н о с и т е л ь н о е д а в л е н и е** – разность между абсолютным давлением и местным атмосферным давлением.

Местное атмосферное давление может изменяться в зависимости от окружающей температуры, высоты над уровнем моря и местных погодных условий. Американский стандарт атмосферного давления на уровне моря при 59 °F (20 °C) – 14,696 фунта на квадратный дюйм абсолютного давления (psia) или 101,325 кПа абсолютного давления. При измерении относительного давления важно, какое давление является опорным.

Соотношение основных единиц измерения давления

Единица измерения	psi	дюйм рт. ст.	кПа	Мбар	см вод. ст.	мм рт. ст.
psi	1,000	2,036	6,8947	68,947	70,308	51,715
дюйм рт. ст.	0,4912	1,000	3,3864	33,864	34,532	25,400
кПа	0,14504	0,2953	1,000	10,000	10,1973	7,5006
Мбар	0,01450	0,02953	0,100	1,000	1,01973	0,75006
см вод. ст.	1,4223	0,028958	0,09806	0,9806	1,000	0,7355
мм рт. ст.	0,019337	0,03937	0,13332	1,3332	1,3597	1,000

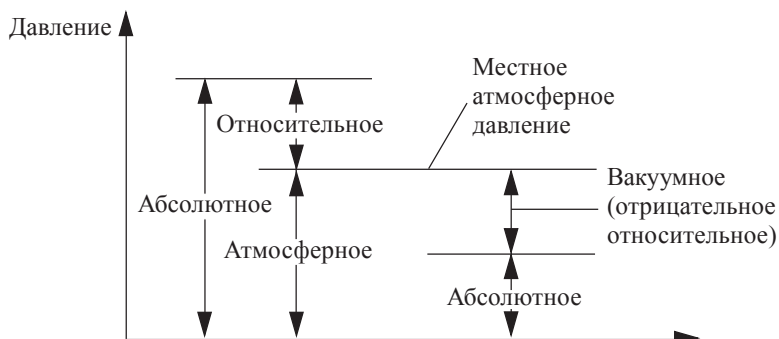


Рис. 5.41. Соотношение между абсолютным и относительным давлением

В английской системе различаются единицы, определяющие давление в абсолютных фунтах на квадратный дюйм (psia) или относительных фунтах на квадратный дюйм (psig). Буква в конце обозначения единицы указывает на тип измеряемого давления. Для других единиц важно определить: относительное или абсолютное давление измеряется. Относительное давление в соответствии с соглашением всегда положительно. «Отрицательное» относительное давление определяется как вакуумное. В а к у у м н ы м называется давление, меньшее местного абсолютного атмосферного дав-

ления. Д и ф ф е р е н ц и а л ь н о е д а в л е н и е – это разность между двумя неизвестными давлениями. Этот тип измерения давления обычно используется, чтобы получить падение давления в системе подачи текучей среды. При измерении разности давлений не важно, какое из них считать опорным. В дополнение к трем типам измеряемого давления имеются два типа систем с текучими средами: статические и динамические системы. Сами названия подразумевают, что в статической системе сфера находится в покое, а в динамической движется.

Давление в статических системах. Давление, измеренное в статической системе, называется статическим. В системе, показанной на рис. 5.42, в однородной статической текучей среде давление распределено равномерно и изменяется только в вертикальном направлении.

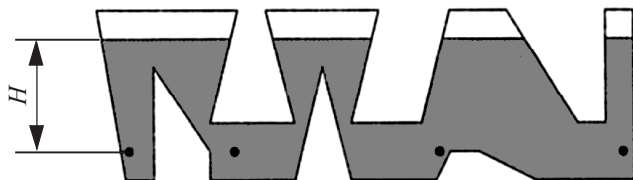


Рис. 5.42. Пример однородной статической среды

Давление сохраняет одно и то же значение во всех точках на данном горизонтальном уровне жидкости независимо от формы сосуда, но увеличивается с глубиной и действует одинаково во всех направлениях. Увеличение давления с ростом глубины определяется, в сущности, влиянием веса жидкости, находящейся выше данного уровня. На рис. 5.43 показаны два сосуда с одинаковой жидкостью, при одном и том же внешнем давлении – P .

На одной и той же глубине в любом из сосудов давление будет одинаковым. Следует обратить внимание на то, что стороны большего сосуда не вертикальны. Давление зависит только от глубины и совершенно не зависит от формы сосуда. Если рабочая среда – газ, увеличение давления в среде по высоте столба в большинстве

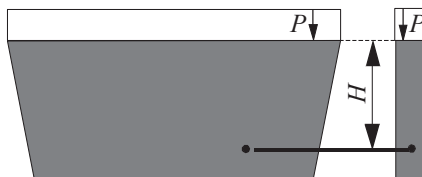


Рис. 5.43. Пример определения давления жидкости в сосудах

случаев незначительно, поскольку плотность и, следовательно, вес среды намного меньше, чем внешнее давление. Однако это становится несправедливым, если система достаточно велика (например, если рассматривается вся земная атмосфера) или внешнее давление достаточно мало.

Давление в статической жидкости может быть легко рассчитано, если известна плотность жидкости. Абсолютное давление на глубине H в текучей среде определяется из уравнения

$$P_{\text{абс}} = P + \rho \cdot g \cdot H, \quad (5.66)$$

где $P_{\text{абс}}$ – абсолютное давление на глубине H ; P – внешнее давление на поверхности жидкости (для большинства открытых систем это будет атмосферное давление); ρ – плотность жидкости; g – гравитационное ускорение ($g = 32,174$ фута/с²) ($9,81$ м/с²); H – глубина, на которой определяется давление.

Давление в динамических системах. Динамические системы более сложны для анализа, чем статические системы, и, соответственно, более сложной является методика проведения измерений в них. В динамической системе давление обычно определяется с помощью трех различных терминов. Во-первых, статическое давление p_s , которое измеряется так же, как и в статической системе. Статическое давление не зависит от движения среды. Как и в статических системах, статическое давление действует одинаково во всех направлениях. Во-вторых, динамическое давление p_d , связанное со скоростью потока в среде. И, наконец, в-третьих, полное давление, являющееся просто суммой статического и динамического давлений [27]:

$$p_t = p_d + p_s. \quad (5.67)$$

Динамическое давление, действующее на поверхность, нормальную направлению течения, увеличивает статическое давление на величину, пропорциональную квадрату скорости течения V :

$$p_d = \frac{\rho V^2}{2}, \quad (5.68)$$

где ρ – плотность жидкости.

Изменение этих давлений в движущейся жидкости может быть выполнено с помощью двух отдельных датчиков, соединенных с выходными отверстиями трубки Пито, один из которых показывает статическое (датчик А), а второй – полное давление (датчик В). Сопоставляя выходные сигналы этих датчиков, получают величину динамического давления (рис. 5.44).

Например, трубку Пито можно снабдить двумя миниатюрными датчиками так, чтобы мембрана одного из них была перпендикулярна оси приемного канала (направлению течения), а второго – параллельна этой оси. Проще всего выполнить конструкцию так, чтобы измеряемое также независимо статическое давление действовало на заднюю поверхность мембраны, а полное давление – на ее переднюю поверхность. Таким образом, любой датчик, имеющий входное отверстие для давления сравнения, т. е. датчик избыточного давления, пригоден для измерения динамического давления.

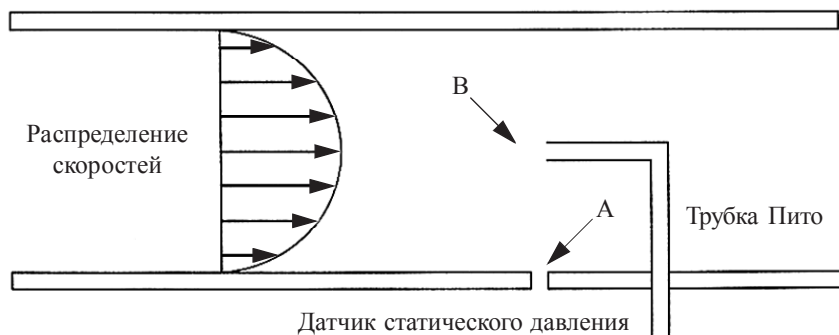


Рис. 5.44. Пример определения динамического давления в системе

Вязкость жидкости оказывает давление в случае, когда нельзя пренебрегать паразитным объемом датчиков или когда мал диаметр и велика длина магистралей, соединяющих датчик с полостью, находящейся под давлением. Наличие препятствий на стенке, содержащей приемник давления в движущейся жидкости, возмущает течение вдоль стенки и также вносит ошибку в показания. Поэтому предпочтительно размещать датчик так, чтобы его мембрана находилась заподлицо со стенкой, на которой измеряется давление (стенка цилиндра машины, трубопровода, аэродинамической модели и т. д.).

Кроме того, не следует располагать датчик в любой точке системы, где может быть нарушена ламинарность потока, как до датчика, так и после него. К таким точкам относятся любые преграды типа клапанов, разветвителей потока, насосов, крыльчаток и т. п. Чтобы увеличить точность измерения давления в динамической системе, следует отступить не менее чем на 2 диаметра трубы вверх по течению. Кроме того, диаметр трубки Пито должен быть намного (по крайней мере, в 30 раз) меньше диаметра трубы, проводящей измеряемый поток. Могут также использоваться спрямители потока, чтобы минимизировать любые изменения в направлении потока. При использовании трубки Пито рекомендуется также измерять статическое давление на том же уровне, что и полное давление.

При протекании потока через трубу поля скоростей полное и динамическое давления неоднородны. Около стенки любой трубы вследствие трения существует область с нулевой скоростью потока. На рис. 5.44 показано приближенное распределение скоростей в трубе. Форма распределения будет зависеть от состояния среды, потока и давления. Чтобы точно определить среднее динамическое давление в сечении трубы, необходимо получить ряд значений полного давления в ее сечении. Эти измерения давления должны быть проведены при различных радиусах и углах в полярной системе или различной ширине и высоте в декартовой системе координат для сечения; однажды сняв эту характеристику для данной трубы, можно легко вычислить корреляцию между значением полного давления в центре трубы и общим средним давлением. Эта методика также используется, чтобы определить скоростной профиль внутри трубы.

5.3. Планирование эксперимента

5.3.1. Общие сведения

При проведении научно-технических исследований основная часть материальных средств и времени идет на выполнение экспериментальных работ. Поэтому естественно стремление исследователей запланировать и выполнить минимальный объем экспериментов, но достаточный для решения поставленной задачи. Вопрос о том, какой минимально необходимый объем и каких экспериментов запланировать и выполнить, может быть решен с помощью теории планирования эксперимента.

Для простых задач спланировать эксперимент просто. Для решения же сложных многофакторных задач без специальной теории планирования эксперимента не обойтись, ее необходимо будет изучить и применить. Необходимость выработки способов такого экспериментирования послужила стимулом для формирования в середине XX в. специальной математической дисциплины под названием «планирование эксперимента».

П л а н и р о в а н и е э к с п е р и м е н т а (ПЭ) – раздел математической статистики, изучающий рациональную организацию измерений, подверженных случайным влияниям. В настоящее время это достаточно развитая научная дисциплина, которой посвящены десятки монографий, многие сотни научных статей.

Исследователь в прикладных науках обычно использует готовые схемы, разработанные математиками, тем не менее ему необходимо достаточно ясно представлять смысл таких схем, ибо без этого он не сможет их «привязывать» к своим задачам. В основном планирование эксперимента направлено на оптимизацию решений четырех видов задач:

- 1) оценка влияния различных факторов на изучаемый показатель (факторное направление);
- 2) кратчайший путь поиска экстремальных (максимальных или минимальных) значений искомого показателя;
- 3) поиск оптимальных условий протекания исследуемого процесса;

4) планирование отсеивающих экспериментов, в которых из очень широкого многообразия факторов выделяются наиболее существенные, т. е. с наибольшим влиянием на изучаемый показатель (специфические методы).

Оптимизация может идти по пути:

- получения наибольшего количества информации (например, наибольшей точности оценок) при имеющихся возможностях, т. е. при заданных (ограниченных) затратах времени и материальных средств;
- минимизации затрат времени и материальных средств при минимальных потерях информации.

Планирование эксперимента связано с повышением эффективности в основном многофакторных экспериментов, но оно охватывает и однофакторные эксперименты. В частности, рассмотренная выше рандомизация тоже относится к области планирования эксперимента.

Теория планирования эксперимента используется прежде всего для решения различных сложных многофакторных задач. Круг таких задач весьма широк: это нахождение функциональных или корреляционных связей (зависимостей) между какими-либо рассматриваемыми величинами и факторами, определяющими их, т. е. нахождение математических моделей, определение оптимального режима какого-либо многофакторного технологического процесса; определение оптимального состава какого-либо сложного, многокомпонентного продукта с заданными свойствами и тому подобные задачи.

Рассмотрим организацию и проведение эксперимента сначала по традиционной схеме.

5.3.2. Планы первого порядка.

Основные понятия и определения

Чаще всего эксперимент ставят для решения одной из двух основных задач. Первую задачу называют **экстремальной**. Она заключается в отыскании условий процесса, обеспечивающих получение оптимального значения выбранного параметра. Призна-

ком экстремальных задач является требование поиска экстремума некоторой функции. Эксперименты, которые ставят для решения задач оптимизации, называют экстремальными. Вторую задачу называют *и н т е р п о л я ц и о н н о й*. Она состоит в построении интерполяционной формулы для предсказаний значений изучаемого параметра, зависящего от ряда факторов. Для решения экстремальной или интерполяционной задачи необходимо иметь математическую модель исследуемого объекта. Модель объекта получают, используя результаты опытов. При исследовании многофакторного процесса постановка всех возможных опытов для получения математической модели связана с огромной трудоемкостью эксперимента, так как их число очень велико. Задача планирования состоит в установлении минимально необходимого числа экспериментов и условий их проведения, в выборе методов математической обработки результатов и в принятии решений. Планирование экспериментов значительно сокращает их число, необходимое для получения модели процесса. Частным случаем планирования эксперимента является планирование экстремального эксперимента, т. е. процесс выбора их числа и условий проведения, минимально необходимых для нахождения экстремальных экспериментов с помощью метода Бокса – Уилсона, называемого методом крутого восхождения.

Метод Бокса – Уилсона предусматривает проведение экспериментов небольшими сериями. В каждой серии одновременно варьируют все факторы по определенным правилам. Эксперименты проводят так, чтобы после математической обработки результатов предыдущей серии можно было спланировать следующую серию.

При планировании экстремального эксперимента цель исследования должна быть четко сформулирована и должна иметь количественную оценку. Характеристику цели, заданную количественно, называют *п а р а м е т р о м о п т и м и з а ц и и*. Параметр оптимизации является реакцией, или откликом на воздействие факторов, определяющих поведение процесса. Результаты эксперимента используют для получения математической модели исследуемого процесса. *М а т е м а т и ч е с к а я м о д е л ь* – система

математических соотношений, описывающих изучаемый процесс или явление. При планировании эксперимента под математической моделью часто понимают уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Такое уравнение называют функцией отклика.

При постановке экстремальных экспериментов на первом этапе находят область оптимума. На втором этапе стремятся получить более полное представление о поверхности отклика в области оптимума. Решение экстремальной задачи предусматривает получение функции отклика и нахождение с помощью ее оптимальных условий протекания процесса. В общем виде функция отклика, являющаяся и параметром оптимизации η , может быть представлена зависимостью

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где x_1, x_2, \dots, x_k – независимые переменные факторы.

Если функция отклика известна, то оптимальные условия процесса находят аналитически, без постановки эксперимента. Однако часто приходится решать экстремальные задачи при неполном знании механизма процесса. В этом случае зависимость функции отклика неизвестна, и поэтому вынуждены ограничиваться представлением ее, например, полиномом вида

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \dots,$$

где β_0, β_1, \dots – коэффициенты регрессии при соответствующих переменных.

По результатам эксперимента можно определить только выборочные коэффициенты регрессии $b_0, b_1, b_2, b_{12}, \dots$, которые являются лишь оценками теоретических коэффициентов регрессии $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \dots$. Уравнение регрессии, полученное на основании экспериментов и представляющее собой выборочную оценку у функции отклика η , может быть записано следующим образом:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + \dots$$

На первом этапе планирования эксперимента для определения направления движения к оптимуму и крутого восхождения

по поверхности отклика функцию отклика выражают полиномом первой степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_kx_k. \quad (5.69)$$

Для определения коэффициентов уравнения (5.69) достаточно реализовать факторный эксперимент типа $2k$, где k – число факторов. Планы экспериментов типа $2k$ называют п л а н а м и п е р - в о г о п о р я д к а.

Крутое восхождение заканчивают после достижения области оптимума. Область оптимума чаще всего удается описать полиномом второй степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \\ + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2. \quad (5.70)$$

Чтобы определить все коэффициенты уравнения (5.70), необходимо реализовать план эксперимента, в котором каждый фактор варьируется не менее чем на трех уровнях. Планы эксперимента, позволяющие оценить коэффициенты полинома второй степени, называют п л а н а м и в т о р о г о п о р я д к а.

Объект исследования. Для определения параметра оптимизации и выбора схемы планирования эксперимента предварительно изучают объект исследования на основе априорной информации, которую получают, изучая литературные данные и анализируя результаты ранее проведенных работ. При планировании эксперимента к объекту исследования предъявляют следующие требования:

1. Объект исследования должен удовлетворять требованию воспроизводимости. При многократном повторении эксперимента его результат имеет разброс значений, который характеризует воспроизводимость результата. Объект исследования удовлетворяет требованию воспроизводимости, если его многократное повторение дает результаты с разбросом значений, не превышающим некоторой заданной величины.

2. Объект должен быть управляемым, но практически нет абсолютно управляемых объектов. На реальный объект действуют как управляемые, так и неуправляемые факторы. Последние влияют

на воспроизводимость результатов эксперимента и могут служить причиной ее нарушения. Если требование воспроизводимости удовлетворяется, выявляют возможность проведения активного эксперимента, предусматривающего активное вмешательство в исследуемый процесс и выбор для каждого эксперимента управляемых факторов на тех уровнях, которые представляют интерес для исследования.

Объект, на котором возможен активный эксперимент, называют **управляемым**.

Параметр оптимизации. При планировании эксперимента важно правильно выбрать параметр оптимизации. Движение к оптимуму возможно, если выбран один параметр оптимизации, а другие выступают в качестве ограничений. Возможно построение обобщенного параметра как функции от множества исходных параметров. Параметр оптимизации должен быть количественным, доступным для измерения и должен выражаться одним числом. Если измерение параметра невозможно, то пользуются ранговой оценкой. **Ранг** — это оценка параметра оптимизации по заранее выбранной шкале: двухбалльной, пятибалльной, десятибалльной и т. п. Ранговый параметр имеет ограниченную дискретную область определения. В простейшем случае область содержит два значения: да — нет; хорошо — плохо; брак — годные детали и т. д. При прочих равных условиях предпочтение необходимо отдавать количественному измерению, так как ранговая оценка носит субъективный характер.

Параметр оптимизации должен быть однозначным в статистическом смысле, т. е. заданному сочетанию уровней факторов должно соответствовать одно (с точностью до ошибки эксперимента) значение параметра оптимизации; эффективным в статистическом смысле, т. е. определяться с наибольшей точностью, что позволяет сократить до минимума число параллельных экспериментов; существовать для всех состояний исследуемого объекта; иметь физический смысл.

Параметры оптимизации могут быть экономическими, технико-экономическими, технико-технологическими и др. Экономическими

являются прибыль, себестоимость, рентабельность. К технико-экономическим относят производительность, надежность, долговечность. Техничко-технологическими параметрами являются механические, физические, физико-химические и некоторые другие характеристики изделия. Большинство параметров оптимизации прямо или косвенно связано с экономичностью производства или экономичностью эксплуатации изделия.

Факторы. Фактором называют независимую переменную величину, влияющую на параметр оптимизации. Каждый фактор имеет область определения – совокупность всех значений, которые может принимать фактор.

При исследовании процесса необходимо учитывать все существенные факторы. Если по каким-либо причинам влияние некоторых факторов невозможно учесть в эксперименте, то эти факторы должны быть стабилизированы на определенных уровнях в течение всего эксперимента. У р о в н я м и называют значения факторов в эксперименте. Если число факторов велико, то необходимо отсеять те факторы, которые оказывают незначительное влияние на параметр оптимизации. Отсеивание несущественных факторов производят на основе априорного ранжирования или с помощью постановки отсеивающих экспериментов.

Факторы должны быть: 1) управляемыми, т. е. позволяющими экспериментатору устанавливать их требуемые значения и поддерживать постоянными эти значения в течение эксперимента; 2) непосредственно воздействующими на объект исследования, так как трудно управлять фактором, который является функцией других факторов; 3) совместимыми, т. е. все комбинации уровней факторов должны быть осуществимы и безопасны; 4) независимыми, т. е. позволяющими экспериментатору устанавливать требуемые уровни любого фактора независимо от уровней других факторов.

Модель. Под математической моделью понимают вид функции отклика $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Выбор модели зависит от задачи исследования и от предъявляемых требований к модели. Экстремальные задачи часто решают, используя шаговый метод. В этом случае модель должна удовлетворять требованиям этого метода.

В основе шагового метода лежит предположение, что совокупность значений параметра оптимизации y , полученная при различных сочетаниях факторов x_i , образует поверхность отклика. Для наглядности представления о поверхности отклика при наличии y_{\max} рассмотрим простейший случай, при котором число факторов равно двум (x_1 и x_2). Для каждого фактора установлены два значения: максимальное и минимальное. Между этими значениями каждый фактор может изменяться непрерывно или дискретно.

Границы значений факторов образуют на плоскости $x_1 O x_2$ (рис. 5.45) прямоугольник $ABCD$, внутри которого лежат точки возможных значений x_1 и x_2 . Если по оси y откладывать значения y_i , полученные при различных сочетаниях значений факторов, то точки y_i будут лежать на поверхности отклика. На этой поверхности находится точка M , соответствующая оптимальному значению y . Для нахождения этой точки необходимо шаг за шагом двигаться по поверхности отклика. Шаговый метод исходит из предположения, что поверхность отклика является гладкой и имеет единственный оптимум. Поверхность отклика расположена в $k + 1$ -мерном пространстве, которое называют факторным. Размерность факторного пространства зависит от числа k факторов. При большом числе факторов это пространство является многомерным, и геометрическая интерпретация функции отклика становится невозможной. Для описания в многомерном пространстве поверхности отклика пользуются языком алгебры. Гладкость поверхности отклика и наличие на ней одной точки оптимума позволяют двигаться к последней в любом направлении, независимо от исходной точки. При шаговом методе каждому фактору придают два значения: максимальное и минимальное. Эти значения составляют только часть возможных значений факторов. На первом этапе реализации шагового метода выбирается лишь какая-то подобласть из области возможных значений факторов, и в этой подобласти ставится эксперимент.

На основании результатов этого эксперимента строится первая модель, по которой предсказываются отклики для значений факторов, выходящих за пределы выбранной подобласти. Чем дальше

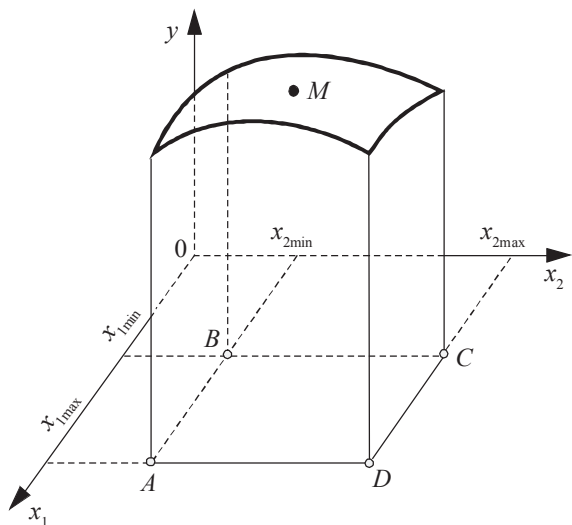


Рис. 5.45. Изображение поверхности отклика

от этой подобласти лежит точка, определяющая значения факторов, тем с меньшей точностью путем экстраполяции можно предсказать значение отклика для этой точки. Поэтому экстраполяцию производят вблизи подобласти эксперимента и используют ее для выбора условий проведения следующего эксперимента, т. е. устанавливают новые интервалы значений факторов или выбирают новую подобласть факторного пространства. Поставив новый эксперимент, строят вторую модель и на основании ее делают следующий шаг в направлении к оптимуму. В этом и заключается сущность шагового метода.

Исходя из сущности этого метода, к модели предъявляется главное требование, заключающееся в способности модели «предсказывать» направление дальнейших опытов с требуемой точностью. Это означает, что предсказанные по модели значения отклика должны отличаться от фактических не более чем на некоторую наперед заданную величину. Модель, удовлетворяющую этому требованию, называют адекватной. Если имеется несколько удовлетворяющих указанному требованию моделей, то из них выбирается наиболее простая.

Наиболее простой моделью является **п о л и н о м**. Полином линеен относительно неизвестных коэффициентов, что упрощает обработку наблюдений.

Полином может быть первой, второй и более высокой степени. Коэффициенты полинома вычисляют по результатам экспериментов. Чем больше число коэффициентов в полиноме, тем большее количество экспериментов необходимо поставить для их определения. Число коэффициентов зависит от степени полинома: чем выше степень, тем больше число коэффициентов. На первом этапе планирования – определении направления движения к оптимуму и крутого восхождения по поверхности отклика – наиболее целесообразно неизвестную функцию отклика аппроксимировать полиномом первой степени. **А п п р о к с и м а ц и я** – это замена одной функции другой функцией, в каком-то смысле эквивалентной первой. Полином первой степени имеет минимальное число коэффициентов при данном числе факторов и содержит необходимую информацию о направлении градиента, под которым понимают направление наискорейшего улучшения параметра оптимизации. После достижения путем постепенного перемещения по поверхности отклика подобласти, в которой лежит точка оптимума, иногда для более полного описания этой подобласти переходят от полинома первой степени к полиному второй степени. Полином первой степени в общем виде выражается уравнением

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \\ + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{12\dots k}x_1x_2, \dots, x_k.$$

Для трех факторов это уравнение имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Полином второй степени для трех факторов:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + \\ + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

5.3.3. Полный факторный эксперимент

К оптимизации приступают при наличии некоторых результатов предварительных исследований изучаемого объекта. Решение задачи оптимизации начинают с выбора области эксперимента. Выбор этой области производят на основе анализа априорной информации. В области эксперимента устанавливают основные уровни и интервалы варьирования факторов. Основным или нулевым уровнем фактора называют его значение, принятое за исходное в плане эксперимента. Основные уровни выбирают таким образом, чтобы их сочетание отвечало значению параметра оптимизации, по возможности более близкому к оптимальному. Каждое сочетание уровней факторов является многомерной точкой в факторном пространстве. Сочетание основных уровней принимают за исходную точку для построения плана эксперимента. Построение плана эксперимента состоит в выборе экспериментальных точек, симметричных относительно исходной точки или, что одно и то же, центра плана.

Интервалом варьирования фактора называют число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний уровень фактора, а вычитание — нижний. Интервал варьирования не может быть выбран меньше той ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора, а также не может быть настолько большим, чтобы верхний или нижний уровни выходили за пределы области определения фактора. При этом необходимо учитывать, что увеличение интервалов варьирования затрудняет возможность линейной аппроксимации функции отклика.

Для удобства записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных уровни факторов кодируют. В кодированном виде верхний уровень обозначают $+1$, нижний -1 , а основной 0 .

Кодированное значение фактора x_i определяют по зависимости

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0)^2}{\varepsilon_i},$$

где \tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора; \tilde{x}_i^0 – натуральное значение основного уровня i -го фактора; ε_i – интервал варьирования i -го фактора.

При кодировании качественных факторов, имеющих два уровня, верхний уровень обозначается +1, а нижний –1. Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют **полным факторным экспериментом**. Если число уровней каждого фактора m , а число факторов k , то число N всех сочетаний уровней факторов, а следовательно, и число экспериментов определяется зависимостью

$$N = mk.$$

Цель первого этапа планирования экстремального эксперимента – получение линейной модели. Он предусматривает варьирование факторов на двух уровнях. Возможное количество сочетаний уровней факторов в этом случае равно 2^k .

Факторный эксперимент осуществляют с помощью **матрицы планирования**, в которой используют кодированные значения факторов. Так, например, для двух факторов полный факторный эксперимент типа 2^k можно представить матрицей, приведенной в табл. 5.9. Число строк в матрице равно количеству экспериментов. Знаками +1 и –1 обозначают уровни факторов x_1 и x_2 . Значения функции отклика, полученные при выполнении экспериментов, обозначены через y_1, y_2, y_3 и y_4 .

Для упрощения записи условий эксперимента в матрице планирования вместо +1 пишут только «+», а вместо –1 – только «–».

Для движения по градиенту необходима линейная модель. При $k = 2$ моделью будет уравнение регрессии вида $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$.

Значения коэффициентов в этом уравнении определяют с помощью значений функции отклика, полученных в результате экспериментов.

Под числом степеней свободы в статистике понимают разность между числом опытов и количеством коэффициентов модели, вычисленных по результатам этих экспериментов независимо друг от друга. Число степеней свободы f при линейной модели определяется по зависимости

$$f = N - (k + 1),$$

где N – число экспериментов; k – число факторов.

Т а б л и ц а 5.9

Матрица факторного эксперимента

Номер эксперимента	x_1	x_2	y
1	–	–	y_1
2	+	–	y_2
3	–	+	y_3
4	+	+	y_4

Т а б л и ц а 5.10

Матрица планирования

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+	–	–	+	y_1
2	+	+	–	–	y_2
3	+	–	+	–	y_3
4	+	+	+	+	y_4

Так, например, при двух факторах число N экспериментов равно четырем, а для определения коэффициентов уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

достаточно результатов трех. Таким образом, число степеней свободы в рассматриваемом случае, равное единице, может быть использовано для проверки адекватности модели. Величина и знак коэффициента указывают на вклад данного фактора в общий результат при переходе с нулевого на верхний или нижний уровень фактора.

Л и н е й н ы м называют эффект, характеризующий линейную зависимость параметра оптимизации от соответствующего фактора. Э ф ф е к т о м в з а и м о д е й с т в и я называют эффект, характеризующий совместное влияние нескольких факторов на параметр оптимизации. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценить линейные эффекты и все эффекты взаимодействия. Для полного факторного эксперимента типа 2^2 уравнение регрессии с учетом эффектов взаимодействия можно представить зависимостью

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

Для этого эксперимента матрица планирования приведена в табл. 5.10. В матрице содержится столбец фиктивной переменной x_0 . Он вводится для оценки свободного члена b_0 . Столбец x_1x_2 получен перемножением столбцов x_1 и x_2 . Он введен для расчета коэффициента b_{12} . При $k = 2$ построение матриц полного факторного эксперимента не вызывает затруднений, так как все возможные сочетания уровней факторов легко найти простым перебором. При увеличении числа факторов количество возможных сочетаний уровней быстро возрастает, поэтому возникает необходимость в некоторых приемах построения матриц. Рассмотрим два наиболее простых приема. Первый прием основан на правиле чередования знаков. В первом столбце (x_1) знаки чередуются поочередно, во втором они чередуются через 2, в третьем – через 4, в четвертом – через 8, в пятом – через 16 и т. д. по степеням двойки.

Второй прием основан на последовательном достраивании матрицы. Для этого при добавлении нового фактора необходимо повторить комбинации уровней исходного плана сначала при значении нового фактора на верхнем уровне, а затем на нижнем. Последовательное достраивание матрицы при увеличении числа факторов от 2 до 5 показано в табл. 5.11.

Т а б л и ц а 5.11

**Схема построения матрицы при увеличении числа факторов
от 2 до 5**

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+	+	+	+	+	+
2	+	—	+	+	+	+
3	+	+	—	+	+	+
4	+	—	—	+	+	+
5	+	+	+	—	+	+
6	+	—	+	—	+	+
7	+	+	—	—	+	+
8	+	—	—	—	+	+
9	+	+	+	+	—	+
10	+	—	+	+	—	+
11	+	+	—	+	—	+
12	+	—	—	+	—	+
13	+	+	+	—	—	+
14	+	—	+	—	—	+
15	+	+	—	—	—	+
16	+	—	—	—	—	+
17	+	+	+	+	+	—
18	+	—	+	+	+	—
19	+	+	—	+	+	—
20	+	—	—	+	+	—
21	+	+	+	—	+	—
22	+	—	+	—	+	—
23	+	+	—	—	+	—
24	+	—	—	—	+	—
25	+	+	+	+	—	—
26	+	—	+	+	—	—
27	+	+	—	+	—	—
28	+	—	—	+	—	—
29	+	+	+	—	—	—
30	+	—	+	—	—	—
31	+	+	—	—	—	—
32	+	—	—	—	—	—

5.3.4. Дробный факторный эксперимент

При большом числе факторов ($k > 3$) проведение полного факторного эксперимента связано с большим числом экспериментов, значительно превосходящим число коэффициентов линейной модели. Если при получении модели можно ограничиться линейным приближением, т. е. получить адекватную модель в виде полинома

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$$

то число экспериментов можно резко сократить в результате использования дробного факторного эксперимента. Так, например, в полном факторном эксперименте типа 2^2 при линейном приближении коэффициент регрессии b_{12} можно принять равным нулю, а столбец x_1x_2 матрицы (табл. 5.12) использовать для третьего фактора x_3 .

Т а б л и ц а 5.12

Матрица планирования

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	$x_3(x_1x_2)$	y
1	+	+	+	+	y_1
2	+	−	+	−	y_2
3	+	+	−	−	y_3
4	+	−	−	+	y_4

В этом случае линейная модель будет определяться уравнением $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$. Для определения коэффициентов этого уравнения достаточно провести четыре эксперимента вместо восьми в полном факторном эксперименте типа 2^3 . План эксперимента, предусматривающий реализацию половины экспериментов полного факторного эксперимента, называют **п о л у р е п л и к о й**. При увеличении числа факторов ($k > 3$) возможно применение реплик большей дробности. **Д р о б н о й р е п л и к о й** называют план эксперимента, являющийся частью плана полного факторного эксперимента. Дробные реплики обозначают зависимостью 2^{k-p} ,

где p – число линейных эффектов, приравненных к эффектам взаимодействия. При $p = 1$ получают полуреплику; при $p = 2$ получают $1/4$ -реплику; при $p = 3$ получают $1/8$ -реплику и т. д. по степеням двойки. Так, например, если в полном факторном эксперименте 2^3 (табл. 5.13) один из эффектов взаимодействия ($x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$) заменим четвертым фактором x_4 , то получим полуреплику 2^{4-1} от полного факторного эксперимента 2^4 . Если два эффекта взаимодействия заменить факторами x_4 и x_5 , то получим $1/4$ -реплику 2^{5-2} от полного факторного эксперимента 2^5 .

Можно получать $1/8$ -реплику от полного факторного эксперимента 2^6 , заменив три эффекта взаимодействия факторами x_4, x_5 и x_6 . Если заменить четыре эффекта взаимодействия факторами x_4, x_5, x_6 и x_7 , то получим $1/16$ -реплику 2^{7-4} от полного факторного эксперимента 2^7 .

Т а б л и ц а 5.13

Матрица полного факторного эксперимента типа 2^3

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	–	–	+	+	–	–	+	y_1
2	+	+	–	+	–	+	–	–	y_2
3	+	–	+	+	–	–	+	–	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	+	–	–	–	+	+	+	–	y_5
6	+	+	–	–	–	–	+	+	y_6
7	+	–	+	–	–	+	–	+	y_7
8	+	+	+	–	+	–	–	–	y_8

Реплики, которые используют для сокращения числа экспериментов в 2^m раз, где $m = 1, 2, 3, \dots$, называют **р е г у л я р н ы м и**.

В связи с тем, что в дробных репликах часть взаимодействий заменена новыми факторами, найденные коэффициенты уравнения

регрессии будут являться совместными оценками линейных эффектов и эффектов взаимодействия. Так, например, если в матрице (см. табл. 5.12) вычислим элементы столбцов для произведений x_1x_3 и x_2x_3 , то увидим, что элементы столбца x_1x_2 совпадают с элементами столбца x_2 , а элементы столбца x_2x_3 – с элементами столбца x_1 . Следовательно, коэффициенты b_1, b_2, b_3 будут оценками совместных эффектов, а именно:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

Коэффициент b_1 является оценкой влияния фактора x_1 и парного взаимодействия x_2x_3 на функцию отклика. Влияние фактора x_1 в этом случае характеризуется величиной β_1 , а влияние взаимодействия – величиной β_{23} . Оценки, в которых невозможно разделить линейный эффект и эффект взаимодействия, называют с м е ш а н н ы м и. Линейные эффекты рекомендуется смешивать, прежде всего, с теми взаимодействиями, которые согласно априорной информации незначимы.

Число несмешанных линейных эффектов в дробной реплике называют ее разрешающей способностью.

Часто приходится решать задачи, в которых заранее можно полагать, что эффекты взаимодействия, хотя и малы по сравнению с линейными, но все же не равны нулю. В таких случаях необходимо заранее определить, какие коэффициенты являются смешанными оценками. Тогда в зависимости от условий поставленной задачи подбирается такая дробная реплика, с помощью которой можно извлечь максимальную информацию из эксперимента.

Прямая оценка разрешающей способности дробной реплики затруднена. Поэтому дробные реплики задают с помощью генерирующих соотношений. Генерирующим называют соотношение, которое показывает, какое из взаимодействий принято незначимым и заменено новым фактором.

План типа 2^{3-1} может быть представлен двумя полурепликами (табл. 5.14), которые задаются одним из следующих генерирующих соотношений:

$$x_3 = x_1x_2; \quad x_3 = -x_1x_2.$$

Генерирующие соотношения умножим на новую независимую переменную x_3 :

$$x_3^2 = x_1 x_2 x_3; \quad x_3^2 = -x_1 x_2 x_3.$$

Т а б л и ц а 5.14

Две полуреплики плана типа 2^{3-1}

Номер эксперимента	$x_3 = x_1 x_2$			Номер эксперимента	$x_3 = -x_1 x_2$		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
1	—	+	—	1	—	+	+
2	+	+	+	2	+	+	—
3	—	—	+	3	—	—	—
4	+	—	—	4	+	—	+

Поскольку всегда $x_i^2 = 1$, получим следующие соотношения:

$$1 = x_1 x_2 x_3; \quad 1 = -x_1 x_2 x_3. \quad (5.71)$$

В результате умножения генерирующего соотношения на новую переменную получают так называемый определяющий контраст. Для указанных выше полуреplik определяющими контрастами будут зависимости (5.71). Зная определяющий контраст, можно найти соотношения, задающие совместные оценки. Для этого необходимо умножить независимые переменные x_1 , x_2 и x_3 на определяющий контраст. Умножая определяющие контрасты (5.71) на x_1 , получим соотношения

$$x_1 \cdot 1 = x_1^2 x_2 x_3; \quad x_1 \cdot 1 = -x_1^2 x_2 x_3;$$

так как $x_i^2 = 1$, то

$$x_1 = x_2 x_3; \quad x_1 = -x_2 x_3.$$

Умножая определяющие контрасты на x_2 и x_3 , получаем следующие соотношения:

$$x_2 = x_1 x_3; \quad x_2 = -x_1 x_3;$$

$$x_3 = x_1 x_2; \quad x_3 = -x_1 x_2.$$

Это означает, что коэффициенты регрессии будут оценками:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{23};$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{13};$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{12}.$$

Полуреплика 2^{4-1} может быть задана генерирующим соотношением $x_4 = x_1 x_2 x_3$. Матрица планирования этой полуреплики представлена табл. 5.15.

Т а б л и ц а 5.15

Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1 x_2 x_3 x_4$

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+	—	—	+	+	y_1
2	+	+	—	+	—	y_2
3	+	—	+	+	—	y_3
4	+	+	+	+	+	y_4
5	+	—	—	—	—	y_5
6	+	+	—	—	+	y_6
7	+	—	+	—	+	y_7
8	+	+	+	—	—	y_8

Определяющим контрастом полуреплики является соотношение

$$1 = x_1 x_2 x_3 x_4.$$

Совместные оценки будут определяться следующим образом:

$$x_1 = x_2 x_3 x_4 \quad b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{234};$$

$$x_2 = x_1 x_3 x_4 \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{134};$$

$$x_3 = x_1 x_2 x_4 \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{124};$$

$$x_4 = x_1 x_2 x_3 \quad b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{123};$$

$$\begin{array}{ll}
 x_1 x_2 = x_2 x_4 & b_{12} \rightarrow \beta_{12} + \beta_{34}; \\
 x_1 x_3 = x_3 x_4 & b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{24}; \\
 x_1 x_4 = x_2 x_3 & b_{14} \rightarrow \beta_{14} + \beta_{23}.
 \end{array}$$

Полуреплика 2^{4-1} может быть также задана генерирующим соотношением $x_4 = x_1 x_2$. Матрица планирования этой полуреплики представлена табл. 5.16.

Т а б л и ц а 5.16

Полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1 x_2 x_4$

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+	—	—	+	+	y_1
2	+	+	—	+	—	y_2
3	+	—	+	+	—	y_3
4	+	+	+	+	+	y_4
5	+	—	—	—	+	y_5
6	+	+	—	—	—	y_6
7	+	—	+	—	—	y_7
8	+	+	+	—	+	y_8

Определяющим контрастом полуреплики является соотношение

$$1 = x_1 x_2 x_4.$$

Совместные оценки в этом случае будут определяться следующим образом:

$$\begin{array}{ll}
 x_1 = x_2 x_4 & b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{24}; \\
 x_2 = x_1 x_4 & b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{14}; \\
 x_3 = x_1 x_2 x_3 x_4 & b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{1234}; \\
 x_4 = x_1 x_2 & b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{12};
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
x_1x_3 = x_2x_3x_4 & b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{234}; \\
x_2x_3 = x_1x_3x_4 & b_{23} \rightarrow \beta_{23} + \beta_{134}; \\
x_3x_4 = x_1x_2x_3 & b_{34} \rightarrow \beta_{34} + \beta_{123}.
\end{array}$$

В практических задачах тройные и более высокого порядка взаимодействия значительно чаще, чем двойные, бывают равны нулю, и ими обычно можно пренебречь. Полуреплика 2^{4-1} , заданная генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$, позволяет получить отдельные оценки четырех линейных эффектов и три совместные оценки парных взаимодействий. В этом случае отдельными оценками будут b_1, b_2, b_3 и b_4 , так как тройными взаимодействиями $\beta_{234}, \beta_{134}, \beta_{124}$ и β_{123} вследствие их незначимости можно пренебречь. В полуреплике, заданной генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2$, три линейных эффекта, а именно b_1, b_2, b_4 , оказались смешанными с парными взаимодействиями. Разрешающая способность полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$, получилась значительно выше, чем у полуреплики, заданной генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2$. Следовательно, разрешающая способность полуреплики зависит от генерирующего соотношения, которым она задана.

Для оценки разрешающей способности реплик (большой дробности $(1/4, 1/8$ и т. д.) используют обобщающие определяющие контрасты. $1/4$ -реплика 2^{5-2} может быть задана следующими генерирующими соотношениями: $x_4 = x_1x_2x_3$; $x_5 = x_2x_3$. Матрица планирования этой реплики представлена табл. 5.17.

Определяющими контрастами реплики являются соотношения

$$1 = x_1x_2x_3x_4; \quad 1 = x_2x_3x_5.$$

Перемножив определяющие контрасты, получим третье соотношение

$$1 = x_1x_4x_5.$$

Матрица планирования 2^{5-2}

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	+	+	+	–	–	–	y_1
2	+	–	+	–	+	–	y_2
3	+	–	–	–	+	+	y_3
4	+	+	–	–	–	+	y_4
5	+	–	+	+	+	+	y_5
6	+	+	+	+	–	+	y_6
7	+	+	–	+	–	–	y_7
8	+	–	–	+	+	–	y_8

Полная характеристика разрешающей способности рассматриваемой реплики будет определяться обобщающим определяющим контрастом, имеющим вид:

$$1 = x_1 x_2 x_3 x_4 = x_2 x_3 x_5 = x_1 x_4 x_5.$$

Схему смешивания оценок находим последовательным умножением обобщающего определяющего контраста на x_1, x_2, x_3 и т. д.:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_2 x_3 x_4 = x_1 x_2 x_3 x_5 = x_4 x_5 & b_1 &\rightarrow \beta_1 + \beta_{234} + \beta_{1235} + \beta_{45}; \\
 x_2 &= x_1 x_3 x_4 = x_3 x_5 = x_1 x_2 x_4 x_5 & b_2 &\rightarrow \beta_2 + \beta_{134} + \beta_{35} + \beta_{1245}; \\
 x_3 &= x_1 x_2 x_4 = x_2 x_5 = x_1 x_3 x_4 x_5 & b_3 &\rightarrow \beta_3 + \beta_{124} + \beta_{25} + \beta_{1345}; \\
 x_4 &= x_1 x_2 x_3 = x_2 x_3 x_4 x_5 = x_1 x_5 & b_4 &\rightarrow \beta_4 + \beta_{123} + \beta_{2345} + \beta_{15}; \\
 x_5 &= x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 = x_2 x_3 = x_1 x_4 & b_5 &\rightarrow \beta_5 + \beta_{12345} + \beta_{23} + \beta_{14}; \\
 x_1 x_2 &= x_3 x_4 = x_1 x_3 x_5 = x_2 x_4 x_5 & b_{12} &\rightarrow \beta_{12} + \beta_{34} + \beta_{135} + \beta_{245}; \\
 x_1 x_3 &= x_2 x_4 = x_1 x_2 x_5 = x_3 x_4 x_5 & b_{13} &\rightarrow \beta_{13} + \beta_{24} + \beta_{125} + \beta_{345}.
 \end{aligned}$$

Для $1/16$ -реплики генерирующими соотношениями

$$x_4 = x_1 x_2 x_3; \quad x_5 = x_1 x_2; \quad x_6 = x_1 x_3; \quad x_7 = x_2 x_3$$

матрица планирования представлена табл. 5.18.

Т а б л и ц а 5.18

Матрица планирования 2^{7-4}

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y
1	+	+	–	+	–	–	+	–	y_1
2	+	–	–	+	+	+	–	–	y_2
3	+	–	+	+	+	+	+	+	y_3
4	+	+	+	+	–	–	–	+	y_4
5	+	–	–	–	+	–	–	+	y_5
6	+	+	–	–	–	+	+	+	y_6
7	+	+	+	–	–	+	–	–	y_7
8	+	–	+	–	+	–	+	–	y_8

Определяющими контрастами этой реплики будут соотношения:

$$1) 1 = x_1 x_2 x_3 x_4; \quad 2) 1 = x_1 x_2 x_5; \quad 3) 1 = x_1 x_3 x_6; \quad 4) 1 = x_2 x_3 x_7.$$

Если попарно перемножить определяющие контрасты $1x_2$; $1x_3$; $1x_4$; $2x_3$; $2x_4$; $3x_4$, то получим:

$$1 = x_3 x_4 x_5; \quad 1 = x_2 x_4 x_6; \quad 1 = x_1 x_4 x_7;$$

$$1 = x_2 x_3 x_5 x_6; \quad 1 = x_1 x_3 x_5 x_7; \quad 1 = x_1 x_2 x_6 x_7.$$

Произведения определяющих контрастов по три: $1x_2 x_3$; $1x_2 x_4$; $2x_3 x_4$; $1x_3 x_4$ – будут равны:

$$1 = x_1 x_4 x_5 x_6; \quad 1 = x_2 x_4 x_5 x_7; \quad 1 = x_5 x_6 x_7; \quad 1 = x_3 x_4 x_6 x_7.$$

Умножая определяющие контрасты по четыре, получим:

$$1 = x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7.$$

Чтобы полностью характеризовать разрешающую способность данной реплики, запишем обобщающий определяющий контраст:

$$\begin{aligned} 1 &= x_1x_2x_3x_4 = x_1x_2x_5 = x_1x_3x_6 = x_2x_3x_7 = x_3x_4x_5 = x_2x_4x_6 = x_1x_4x_7 = \\ &= x_2x_3x_5x_6 = x_1x_3x_5x_7 = x_1x_2x_6x_7 = x_1x_4x_5x_6 = x_2x_4x_5x_7 = x_5x_6x_7 = \\ &= x_3x_4x_6x_7 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7. \end{aligned}$$

Если эффектами взаимодействия, начиная с тройных, можно пренебречь, то коэффициенты будут оценками:

$$\begin{aligned} b_1 &\rightarrow \beta_1 + \beta_{25} + \beta_{36} + \beta_{47}; & b_2 &\rightarrow \beta_2 + \beta_{15} + \beta_{37} + \beta_{46}; \\ b_3 &\rightarrow \beta_3 + \beta_{16} + \beta_{27} + \beta_{45}; & b_4 &\rightarrow \beta_4 + \beta_{35} + \beta_{26} + \beta_{17}; \\ b_5 &\rightarrow \beta_5 + \beta_{12} + \beta_{34} + \beta_{67}; & b_6 &\rightarrow \beta_6 + \beta_{13} + \beta_{24} + \beta_{57}; \\ b_7 &\rightarrow \beta_7 + \beta_{23} + \beta_{14} + \beta_{56}. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем весьма сложную систему смешивания. Все линейные эффекты оказались смешанными с несколькими парными взаимодействиями, поэтому разрешающая способность этой дробной реплики очень низкая. Пользоваться такой репликой можно лишь в том случае, если все парные взаимодействия близки к нулю.

Выбор дробной реплики зависит от конкретной задачи. Для получения линейной модели рекомендуют выбирать дробные реплики с возможно большей разрешающей способностью, т. е. реплики, у которых линейные эффекты смешаны с эффектами взаимодействия, близкими к нулю. При выборе дробной реплики важно учитывать насыщенность плана, т. е. соотношение между числом опытов и числом коэффициентов, определяемых по результатам этих экспериментов. Дробная реплика, полученная заменой всех эффектов взаимодействия новыми факторами, называется *насыщенной*. Применение насыщенных планов требует минимального числа экспериментов. Число экспериментов в матрице насыщенной дробной реплики равно числу коэффициентов линейной модели. Гипотезу адекватности модели в этом случае проверить невозможно, так как число степеней свободы равно нулю.

Например, $1/16$ -реплика от полного факторного эксперимента 2^7 (табл. 5.18) является насыщенной, так как линейная модель не содержит коэффициентов, которые необходимо определить по результатам восьми экспериментов. При этом не остается степеней свободы для проверки адекватности модели.

Дробные реплики широко применяют при получении линейных моделей. Эффективность применения дробных реплик зависит от удачного выбора системы смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия. При построении дробных реплик используют следующее правило: новый фактор, введенный в планирование, нужно поместить в столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь.

5.3.5. Свойства матриц полного и дробного факторных экспериментов

Для матриц таких экспериментов характерны следующие свойства:

1. Свойство симметричности относительно центра эксперимента – алгебраическая сумма элементов столбца каждого фактора равна нулю:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0,$$

где j – номер опыта; i – номер фактора; N – число опытов в матрице.

2. Свойство нормировки – сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = N.$$

3. Свойство ортогональности – сумма построчных произведений элементов любых двух столбцов равна нулю:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} = 0,$$

где i, l – номера факторов, причем $i \neq l$.

Ортогональность является одним из наиболее важных свойств матрицы. Ортогональность матрицы позволяет оценить все коэффициенты уравнения регрессии независимо друг от друга, т. е. величина любого коэффициента не зависит от того, какие величины имеют другие коэффициенты. Если тот или иной коэффициент регрессии окажется незначимым, то его можно не учитывать, не пересчитывая остальных.

4. Свойство ротатабельности: точки в матрице планирования подбирают так, что математическая модель, полученная по результатам полного или дробного факторных экспериментов, способна предсказывать параметры оптимизации с одинаковой точностью в любых направлениях на равных расстояниях от центра эксперимента. Это очень важное свойство матрицы, так как, начиная эксперимент, исследователь не знает, в каком направлении предстоит двигаться в поисках оптимума.

5.4. Эмпирические методы исследования

В технических науках экспериментальные исследования являются обязательным элементом НИР, в то время как теоретические исследования могут отсутствовать. Исследования, в которых нет теоретической части, а закономерности получают непосредственно из экспериментов без объяснений их причин, называются эмпирическими. Иными словами, при эмпирических исследованиях ограничиваются выявлением чисто математических закономерностей между результатами измерений, а вопросы, почему возникают такие закономерности, не рассматриваются.

Общенаучные методы эмпирического познания составляют:

1) наблюдение – целенаправленное, планомерное и систематическое изучение объектов, опирающееся в основном на данные органов чувств (ощущения, восприятия, представления). Это исходный метод эмпирического познания, позволяющий получить первичную информацию об объектах окружающей действительности. Научные наблюдения сопровождаются описанием объекта познания,

необходимого для фиксирования свойств, сторон объектов, составляющих предмет исследования. Описания результатов наблюдений образуют эмпирический базис науки, опираясь на который, исследователи создают эмпирические обобщения, сравнивают изучаемые объекты, проводят их классификацию по тем или иным признакам, выясняют последовательность этапов их становления и развития. По способу проведения наблюдения могут быть непосредственными и опосредованными (с использованием тех или иных технических средств);

2) эксперимент – активное, целенаправленное и строго контролируемое воздействие исследователя на изучаемый объект для выявления и изучения тех или иных сторон, свойств, связей. Экспериментатор может преобразовывать исследуемый объект, создавать искусственные условия его изучения, вмешиваться в естественное течение процессов. Наряду с этим эксперимент можно многократно воспроизводить, он позволяет выявить те связи, которые не обнаруживаются в естественных условиях. Эксперимент используется для опытной проверки гипотез и теорий и для получения новых научных концепций;

3) измерение – это процесс, заключающийся в определении количественных значений тех или иных свойств, сторон изучаемого объекта, явления с помощью специальных технических устройств. Результат измерения получается в виде некоторого числа единиц измерения – эталонов, с которым и сравнивается измеряемая сторона объекта или явления;

4) сравнение – познавательная операция, лежащая в основе суждений о сходстве и различии объектов, сопоставление с целью выяснения того, как соотносятся предметы и явления друг с другом, с внешней средой, со своими структурными элементами. Сравнение возможно по определенному признаку, критерию. Предметы, сравниваемые по одному признаку, могут быть несопоставимы по другому.

В качестве примера чисто эмпирического подхода можно представить изучение зависимости прочности какого-либо металла от содержания в нем конкретной химической примеси, если это

выполнять только путем изготовления образцов этого металла (с примесями) и их испытаний. При изучении такого вопроса теоретическими методами пришлось бы решать довольно сложные задачи, относящиеся к области химии, физики твердого тела и, конечно, металловедения, включая вопросы образования различных структур металла, строения его кристаллической решетки, микродефектов (дислокаций) и т. д. Эмпирический же подход чрезвычайно упрощает решение такой задачи, сводя его к обнаружению чисто математической закономерности между результатами испытаний. Для этого не требуется глубоких знаний ни в металловедении, ни в химии, ни в физике твердого тела. Однако сфера применения полученных таким способом результатов останется неясной, так как нельзя быть уверенным, что учитывалось влияние всех существенных факторов и что результаты испытаний в других условиях не окажутся иными.

В прикладных исследованиях, а еще больше в разработках эмпирический подход чрезвычайно распространен. При решении практических задач всегда возникает множество мелких частных вопросов, которые необходимо решать быстро, с минимальными материальными затратами. Кроме того, рассматриваемая задача может оказаться слишком трудной для теоретического решения, и эмпирический подход может стать временным «выходом из положения», т. е. решением, которое в ходе дальнейших исследований рано или поздно найдет свое объяснение, свою область применения.

Как уже отмечалось, достоинством эмпирических зависимостей является простота их получения, недостатком – ограниченность области рационального применения условиями, в которых они получены. За пределами этих условий они могут быть как приемлемыми, так и неприемлемыми, т. е. всякий раз необходима экспериментальная проверка в новых условиях.

Следует также отметить, что эмпирические исследования значительно меньше теоретических способствуют углублению понимания окружающей действительности, меньше отражают сущность происходящих явлений, перспективы решения конкретной проблемы. По этой причине исследователь всегда должен стремиться

давать свое объяснение каждому полученному результату, формировать как можно более достоверную теоретическую базу своих представлений. Именно это определяет глубину исследований и их познавательную ценность. Ориентация только на эмпирические методы обычно означает слабый прогресс в решении возникающих проблем, дефицит принципиально новых идей, отсутствие четких перспектив. По этой причине в прикладных исследованиях всегда желательно рациональное совмещение теоретических и эмпирических методов.

5.5. Ошибки измерений

5.5.1. Погрешности измерений и их причины

Представительность измеряемой величины. Для общего применения измерительной техники с целью познания процесса или состояния необходимо выполнение одного условия – измерение должно быть представительным. Это обеспечивается в том случае, если из измеренного значения при помощи количественной, закономерной зависимости (так называемого заданного закона) можно сделать заключение о качестве объекта измерения. Если это условие не выполняется, т. е. используемый заданный закон некорректен или не выполнены условия для применения корректного заданного закона, то возникает так называемая погрешность представительности.

Ошибки представительности. На практике ошибки представительности возникают часто, потому что из-за недостаточного знания процессов масштабирования в объекте измерения отсутствует подходящий заданный закон и вместо этого приходится работать с более или менее грубым приблизительным законом. Заурядной иллюстрацией этого является измерение температуры помещения, которая должна быть мерой температурного поля помещения. Из-за отсутствия физически или физиологически обоснованного заданного закона чаще всего измеренная в произвольно выбранной точке местная температура объявляется температурой

помещения. Подобная ситуация имеет место почти всегда при измерении, когда с помощью малого числа датчиков (часто с одним датчиком) необходимо измерить среднее значение поля величин (температуры, концентрации, силового поля и т. п.). Характерно, что при этом большое значение получает выбор места измерения.

Ошибки представительности нередко возникают из-за того, что заданный закон, вполне подходящий при нормальных условиях, применяется и тогда, когда ненормальные условия измерения в сущности этого уже не позволяют. Типичным примером этого является ошибочное измерение эффективного значения переменного тока и переменного напряжения с помощью выпрямительного прибора при несинусоидальном изменении измеряемой величины.

Характерно, что ошибки представительности могут появиться при использовании высококачественных измерительных приборов и что на практике эти ошибки чаще всего могут быть выявлены с трудом и только с помощью больших затрат. Это особенно неприятно из-за того, что ошибки представительности нередко имеют значительную величину и могут многократно превышать остальные погрешности.

5.5.2. Погрешности, связанные с процессом измерения

Влияние условий применения измерительного устройства.

Из классификации погрешностей вытекает влияние условий применения измерительного устройства на погрешность измерения. Существенное влияние эти факторы оказывают на величину обратного воздействия измерительного устройства на процесс. Очень часто требуется соблюдение специальных предписаний по установке чувствительных элементов.

Принципиально для учета и оценки погрешности, связанной с условиями применения измерительного устройства, следовало бы учитывать чрезвычайно большое число влияющих величин. Однако среди этих величин в общем случае имеются такие, которые оказывают наибольшее влияние на результат измерения. В инструкциях по установке и поверке приборов этим величинам предписаны определенные границы. Большинство влияющих величин

часто не учитывают. В идеальном случае многочисленные малые неучтенные воздействия при своих случайных комбинациях взаимно компенсируются. Предполагается, что имеет место статистическое усреднение влияний. В действительности результирующая погрешность от неучтенных величин не равна нулю, а колеблется случайным образом около нуля. Эта случайная результирующая погрешность определяет степень воспроизводимости измерения.

Систематические и случайные погрешности. Условия применения измерительного устройства считаются известными, если наряду с процессом известны и наиболее существенные влияющие величины. Однако, как уже указывалось, всегда остается большое число менее значительных факторов, оказывающих влияние на измерение. Погрешность, вызванная этими факторами, является случайной, так как она возникает в результате случайной комбинации множества отдельных воздействий. Поэтому заранее не известны ни ее абсолютная величина, ни знак. Очевидно, что эти случайные изменения погрешности могут возникать вследствие случайных (стохастических) изменений и одной влияющей величины. Однако в общем случае такие стохастические колебания представляют собой результат случайных комбинаций отдельных процессов. Так, сам отсчет аналогового показания всегда содержит случайную погрешность. Это стохастическое влияние отсчета является, в свою очередь, результатом многих неконтролируемых побочных воздействий.

Если измерение многократно повторять при известных и неизвестных условиях, то измеряемые значения будут колебаться около ожидаемого значения (математического ожидания), которое представляет собой среднее значение результатов бесконечно многих измерений. Воспроизводимость отдельного измерения характеризуется отклонением от математического ожидания, видом этого отклонения, его размером и его повторяемостью (частотой).

Точность, с которой может быть определено (с заданной вероятностью) указанное ожидаемое значение, можно оценить статистически. Эту точность результата измерения не следует смешивать с его правильностью.

Основные влияющие величины бывают известными, и их стремятся поддерживать постоянными; однако они могут отклоняться от тех значений, которые были приняты при градуировке измерительного устройства. Кроме того, воспроизведение образцовых мер никогда не бывает точным и, наконец, действительный закон преобразования в измерительном устройстве может отличаться от желаемого.

Эти погрешности нельзя исключить повторением измерения. В противоположность случайным погрешностям они являются систематическими и отличаются своей воспроизводимостью. Их абсолютная величина, а также знак остаются неизменными при заданных условиях.

В общем случае трудно априори провести различие между существенными и второстепенными воздействиями. Подлежащие учету наиболее существенные влияющие величины могут быть определены в результате обработки опытных данных.

Смысл такого анализа рассмотрим на примере. Одну и ту же гирию многократно взвешивали в течение дня. Полученные результаты дали основание предположить, что «существенная» влияющая величина изменялась в течение серии опытов. Более точный анализ мог бы показать, что такой влияющей величиной, изменяющейся в течение дня, была температура. Повторение опытов в термостатированном помещении подтвердило это утверждение.

Для выявления определенной тенденции в изменении измененных значений, искаженных случайными помехами, могут быть использованы статистические методы обработки, в особенности регрессионный анализ.

Приведенный выше пример, однако, показывает и то, что вопрос о различии случайных и систематических погрешностей решается в зависимости от требуемой точности и способа применения измерительного устройства. Если бы ту же самую серию опытов проводили в течение не одного, а нескольких случайно выбранных дней, то температура оказалась бы случайной величиной. Температурная зависимость не была бы выявлена, точность оказалась бы более низкой, так как разброс случайной погрешности увеличился бы.

Статические и динамические погрешности. Неидеальность передаточной характеристики измерительного устройства причислена к причинам возникновения систематической погрешности. Под передаточной характеристикой мы понимаем математическую зависимость, описывающую взаимосвязь входной и выходной величин.

Передаточной характеристикой линейного измерительного прибора, используемого для определения неизменяющихся по времени величин, является константа. В приборах с нелинейной характеристикой зависимость между выходной и входной величинами описывается алгебраическим или трансцендентным уравнением. В этих случаях погрешности зависят только от размера измеряемой величины и не являются функциями времени – это статические погрешности измерения.

При измерении изменяющейся во времени физической величины связь между входной и выходной величинами описывается дифференциальным уравнением. Возникающие при этом погрешности зависят не только от размера измеряемой величины, но и от характера изменения ее во времени. Поэтому их называют динамическими погрешностями.

Так, неизменная во времени температура может быть измерена термометром «безошибочно», в то время как быстрые изменения температуры из-за его запаздывания отслеживаются неточно.

В показаниях измерительного устройства преобразуется не только измеряемая величина, но также и внешние влияющие величины. При описании возникающих при этом погрешностей следует различать статические и динамические погрешности.

Строго говоря, статические погрешности можно рассматривать как частный случай динамических. Они полностью содержатся в математическом описании последних. Однако с точки зрения практического применения весьма часто встречающиеся измерения постоянных или квазипостоянных величин целесообразно рассматривать отдельно, так как методы описания при этом особенно просты.

5.5.3. Погрешности, связанные с обработкой измеренных величин

Погрешности отсчета и квантования. Очень часто отдельные измеренные величины подвергаются дальнейшей статистической обработке с целью уменьшения разброса либо определения функциональных или статистических зависимостей. Помимо погрешностей, связанных с самим процессом измерения, в этих случаях следует учитывать ряд дополнительных погрешностей.

Для численной обработки измеренных значений последние должны быть представлены в цифровой форме, в виде чисел. При этом возникает погрешность квантования. Однако отсчет аналогового показания тоже связан с дополнительной погрешностью, которая часто бывает не меньше, чем ошибка квантования. Ошибка отсчета в большой степени определяется видом устройства вывода данных. Вследствие оптического обмана, обусловленного, например, разбивкой шкалы штрихами разной толщины, параллаксом или эффектом преломления света, могут возникнуть не только случайные, но и систематические погрешности. Ошибки отсчета и квантования могут привести к серьезным погрешностям результатов при числовой обработке измеренных величин (например, потеря точности, искажения при обращении матриц с неточными членами и т. п.).

Временная дискретизация. Числовая обработка аналогового измерительного сигнала связана с его дискретизацией во времени. Как и в случае применения печатающего устройства для точечной записи или аналого-цифрового преобразователя, измерительный сигнал описывается рядом импульсов, информация в промежутках между которыми теряется. Это следует учитывать при анализе сигналов и дальнейшей обработке, связанной с исследованиями динамических процессов. В соответствии с динамическим характером этих погрешностей оценка их возможна только на основе учета изменения сигнала во времени и характера его дальнейшей обработки.

Погрешность, обусловленная неадекватностью принятой гипотезы. В основе статистических методов обработки в общем

случае лежат некоторые гипотезы, например, предположение, что случайная погрешность подчиняется определенному, обычно нормальному закону распределения.

Предположим, что связь между истинными величинами и показаниями прибора линейна. Следовательно, в идеальном случае измерительные значения должны лежать на прямой, а имеющие место отклонения рассматриваем как случайную погрешность измерения. Метод обработки состоит в расчете такой зависимости, при которой сумма квадратов ошибки была бы минимальной. Этот метод основан на гипотезе нормального распределения погрешности измерения относительно истинного значения, лежащего на прямой, и независимости распределения от величины измеряемого.

Такой метод может обусловить внесение двух дополнительных погрешностей, обусловленных этой гипотезой. Если действительная характеристика отличается от прямой линии, то вводится систематическая погрешность. Затем, если рассеяние погрешности зависит от измеряемого значения (например, растет с увеличением веса), то рассчитанный угол наклона градуировочной прямой является, по меньшей мере, сомнительным. Для улучшения результатов следовало бы квадраты отклонений умножить на некоторые весовые коэффициенты с тем, чтобы в большей мере учесть малые отклонения.

Погрешности результата измерения. При обработке измеренных величин, например, при расчете результата измерения по нескольким измеренным значениям, особое внимание следует уделять распространению погрешностей исходных данных на конечный результат.

Влияние различных измеренных величин на результат измерения может быть совершенно различным. Поэтому только на основании анализа специфики последующей обработки можно сформулировать разумные требования к правильности (систематическая погрешность) и достоверности (случайная погрешность) отдельных измеряемых значений.

5.5.4. Погрешности измерительных устройств

Порог реагирования. Если входная величина измерительного устройства медленно и непрерывно увеличивается от нуля, то выходная величина начинает изменяться только при определенном значении входной величины. Абсолютная величина этого значения называется порогом реагирования или нечувствительностью в нулевой точке. Чтобы исключить неопределенность, связанную с обнаружением факта начала изменения показаний, предусматривается определенное малое изменение показаний Δx_a .

Для счетных (интегрирующих) измерительных приборов установлен так называемый порог реагирования (порог трогания), т. е. нагрузка, при которой прибор начинает счет. Размер этой нагрузки определяют по измеряемой величине при интегрировании в течение некоторого времени.

Вариация показаний. Гистерезис. Упругое последствие. Вариацией называется разность показаний, получаемая при одном и том же значении измеряемой величины при медленном непрерывном или шаговом подходе к метке шкалы один раз – с меньшего, а другой раз – с большего значения. Причины вариации могут быть различными. При наличии люфта в механическом передающем элементе характерна постоянная, не зависящая от измеряемого значения вариация.

Причина вариации может быть связана с гистерезисными явлениями в ферромагнитных материалах. При этом следует иметь в виду, что вариация зависит от предыстории, т. е. от значения в точке возврата. В этом случае вариация должна быть более точно специфицирована. Аналогичная характеристика может иметь место и при механическом гистерезисе. Например, внутреннее трение в материале пружины приводит к тому, что после снятия нагрузки деформация может не восстановиться в полной мере. При этом остающаяся разность зависит, прежде всего, от размера нагрузки (отклонения).

Следующее явление подобного вида – упругое последствие. Если какой-либо подвижный, упругий орган находится в течение длительного времени в отклоненном состоянии, то он больше

не возвращается в свое исходное состояние покоя. Остающаяся разность зависит как от размера отклонения, так и от его длительности. Это упругое последствие исчезает с течением времени.

Понятия «вариация» и «гистерезис» в общем случае требуют более точного описания вызывающих их эффектов и условий их проявления.

Разрешающая способность. Понятие «разрешающая способность» употребляется в разных значениях. Если измеряемая величина начинает медленно и непрерывно увеличиваться от любого, отличного от нуля значения, то в общем случае, например, вследствие гистерезиса, изменение показания констатируется не сразу. При этом под разрешающей способностью понимают изменение входной величины, необходимое для начала изменения показаний. При отсутствии гистерезиса определенная таким образом разрешающая способность соответствует обратной величине чувствительности.

Если показания изменяются дискретно, как, например, у потенциометра с реохордом, то часто разрешающей способностью называют шаг дискретности показаний. Это определение совпадает с понятием «разрешающая способность», используемым для цифровых показывающих приборов. В этом случае ее определяют как значение младшего разряда цифрового отсчета.

Стабильность нуля. Стабильность нуля, в частности электронных устройств, часто характеризуют отношением смещения нуля к величине помехи, его вызвавшей (например, мВ/К).

Временную нестабильность нулевой точки определяют значением максимального дрейфа нуля за определенное время (например, мВ/24 ч). При этом должны быть определены условия применения. Аналогичные изменения показаний могут быть и у чисто механических элементов.

Недостоверность измерения. Предел погрешности. Если систематическую погрешность скорректировать, то остается случайная погрешность. Так как она не может быть предопределена ни по абсолютной величине, ни по знаку, результат измерения является в некоторой мере недостоверным. Однако при статистическом

рассмотрении погрешности можно указать, с какой вероятностью погрешность остается ниже определенного значения.

Недостоверность измерения – это размер погрешности, который не будет превышен с определенной степенью вероятности. Иногда в недостоверность включают также и неучтенные систематические погрешности.

Линейность. Поле допуска. Если номинальная зависимость между измеряемой величиной и показаниями прибора принята линейной, то указание погрешности нелинейности служит для описания отклонения от номинальной характеристики. Чаще всего указывают максимальное отклонение от требуемой прямой, выраженное в процентах от диапазона показаний. Понятие линейности не нормируется, поэтому используют самые разнообразные ее определения.

С понятием линейности тесно связано установление поля допуска. При этом опять необходимо указывать, в каком из двух значений (предельно допустимой погрешности или недостоверности измерения) следует его понимать.

Если же погрешность мультипликативна, т. е. зависит от измеряемого значения, то в верхней части диапазона измерения относительная погрешность $\varepsilon = E/x$ постоянна. В нижней части диапазона (при приближении к нулю) абсолютная погрешность должна была бы теоретически стремиться к нулю. Поэтому вблизи нуля мультипликативное поле допуска заменяется постоянной абсолютной погрешностью.

Классы точности. Так называемые классы точности определяют главным образом для электрических приборов. Например, класс точности 0,2 означает, что максимальная погрешность (в значении предела допускаемой погрешности) равна 0,2 %. При этом под ошибкой понимают предел погрешности.

5.5.5. Статические погрешности измерений.

Виды погрешностей

Статическими погрешностями измерения называют погрешности, возникающие при определении постоянного во времени

измеряемого значения. При этом предполагается, что все переходные процессы в измерительном устройстве завершены; следовательно, измерительный прибор и измеряемая величина находятся в установившемся состоянии.

Если при указанных выше условиях проводить многократные независимые измерения, то возникает ситуация, при которой можно различать два принципиально отличающихся вида погрешностей, так называемые систематические и случайные погрешности.

Систематическую погрешность E_s определяют как отклонение действительного измеряемого значения x от среднего значения (математического ожидания) μ :

$$E_s = \mu - x.$$

Математическое ожидание μ является средним значением бесконечного числа измерений:

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_{ai} / n.$$

При одинаковых условиях эта погрешность всегда имеет ту же самую абсолютную величину и тот же самый знак.

В противоположность этому ни абсолютная величина, ни знак отклонения отдельного измерения от математического ожидания не могут быть предсказаны заранее. Эта случайная погрешность обозначается через E_s . Она соответствует разности между показанием единичного измерения и математическим ожиданием:

$$E_{ai} = x_{ai} - \mu.$$

Различию в природе обоих видов погрешности соответствуют разные способы их описания.

5.5.6. Случайная погрешность отдельного измерения

Колебания случайной погрешности, кажущиеся сначала совершенно беспорядочными, тем не менее, подчиняются в статистическом смысле известным законам.

Если показания какого-либо измерительного прибора, являющиеся сами по себе непрерывными, разбить на интервалы определенной ширины Δx и вычислить относительную частоту попадания показаний в отдельные интервалы при повторных измерениях, то можно получить гистограмму.

При достаточно большом значении n это изображение является представительным, т. е. относительная частота стремится к некоторому пределу и перестает зависеть от n .

Если имеется достаточно большое число показаний, то можно улучшать гистограмму, уменьшая ширину интервалов Δx . Тогда при предельном переходе $\Delta x \rightarrow 0$ и $n \rightarrow \infty$ ступенчатая функция гистограммы переходит в общем случае в непрерывную функцию — плотность распределения (плотность вероятности, дифференциальную функцию распределения) $h(x)$:

$$h(x) = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \frac{\Delta n}{n \Delta x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{dn}{n dx}.$$

Основываясь на определении плотности распределения, можно установить ее прямую связь с функцией распределения. Вероятность того, что измеряемое значение x попадает в интервал $x_1 < x \leq x_2$, определяется площадью F , лежащей под графиком плотности распределения вероятности в этом диапазоне:

$$P(x_1 < x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} h(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \left. \frac{\Delta n}{n} \right|_{x_1}^{x_2}.$$

В частном случае имеем:

$$P(-\infty < x \leq +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \left. \frac{\Delta n}{n} \right|_{x_1}^{x_2} = 1.$$

Часто при обработке результатов измерения представляет интерес вероятность того, что измеренная величина окажется меньше заданного предела x_1 :

$$P(x) = P(x \leq x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} h(x) dx.$$

При $-\infty < x \leq +\infty$ функция распределения изменяется от 0 до 1. В связи с тем, что функция распределения $P(x)$ определяется как интеграл плотности $h(x)$, ее часто называют также интегральной функцией распределения.

Аналогичным образом определяется вероятность того, что измеренная величина окажется больше, чем x_1 :

$$P(x > x_1) = \int_{x_1}^{+\infty} h(x) dx.$$

Среди множества функций распределения особое место для измерительной техники занимает нормальное распределение (распределение Гаусса).

Плотность вероятности нормального распределения определяется следующим уравнением:

$$h(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}; \quad -\infty < x \leq +\infty.$$

Нормальное распределение характеризуется, кроме математического ожидания μ , еще только одним параметром σ – среднеквадратичным (стандартным) отклонением.

При известном среднеквадратичном отклонении σ можно вычислить вероятность того, что случайная погрешность E_{ai} – отклонение показания отдельного измерения от математического ожидания – будет меньше заданного граничного значения c . Эта вероятность

$$P(|x - \mu| \leq c) = 2 \int_{\mu}^c h(x) dx$$

называется **д о в е р и т е л ь н о й в е р о я т н о с т ь ю** (статистической надежностью).

При известном значении σ (рис. 5.46) можно на основании единственного измерения указать верхнюю и нижнюю границы математического ожидания:

$$x_{ai} - c_{p\%} \leq \mu \leq x_{ai} + c_{p\%} \quad \text{или} \quad x_{ai} - E_{ap\%} \leq \mu \leq x_{ai} + E_{ap\%}.$$

Математическое ожидание с доверительной вероятностью $P(\%)$ лежит внутри этих границ. Интервал между этими границами называется доверительным интервалом математического ожидания.

Математическое ожидание определяется следующим образом:

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) x dx.$$

Эта величина соответствует первому моменту плотности распределения – абсциссе центра тяжести площади между зависмостью плотности распределения и осью абсцисс.

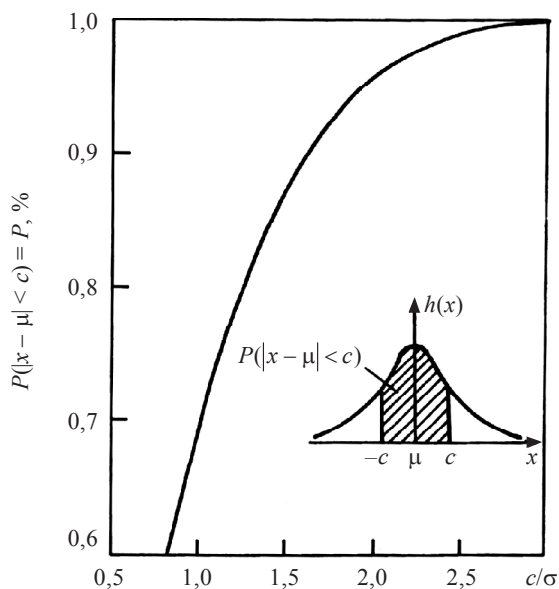


Рис. 5.46. Графическое изображение статистической надежности $P(|x - \mu| \leq c)$ в функции от c/σ

Площадь фигуры, очерченной зависимостью $\int_{-\infty}^{\infty} h(x) dx$, равна единице.

В качестве оценки для μ используется среднее значение \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Среднеквадратичное отклонение σ определяется из формулы

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) x^2 dx.$$

Величина σ^2 , называемая дисперсией, соответствует второму моменту («моменту инерции») плотности распределения вероятностей.

В качестве оценки среднеквадратичного отклонения σ используется рассеяние S , определяемое по формуле

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

5.5.7. Случайная погрешность среднего значения

Чтобы избежать недостоверности случайной погрешности единичного замера, можно усреднить несколько измерений. Полученное таким образом среднее значение представляет собой все же случайную величину, так как n измеренных величин представляют лишь выборку из генеральной совокупности. Это среднее значение, в свою очередь, имеет нормальное распределение и то же самое математическое ожидание μ , но среднеквадратичное отклонение у него меньше, чем при единичном измерении. Между среднеквадратичным отклонением средней величины $\sigma_{\bar{x}}$ и среднеквадратичным отклонением единичного измерения имеется следующее соотношение:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma. \quad (5.72)$$

Усреднение позволяет уменьшить доверительную границу погрешности при заданной доверительной вероятности пропорционально $1/\sqrt{n}$.

Соотношение (5.72) устанавливает связь между теоретическими значениями $\sigma_{\bar{x}}$ и σ , в большинстве случаев не имеющимися в наличии. Ведь среднеквадратичное отклонение σ могло бы быть вычислено по очень большому, теоретически бесконечно большому числу измеренных величин. Если число измерений невелико, то для σ вычисляют оценку S по тем же самым n измеренным значениям, по которым определяется средняя величина \bar{x} . Но в этом случае $\sigma_{\bar{x}}$ и доверительная граница уже не могут быть определены из соотношения (5.72). Определение этих величин основано на t -распределении Стьюдента и осуществляется следующим образом:

1. Выбирают доверительную вероятность P (например, 95,99 % и т. п.).

2. Определяют S :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]},$$

где n – объем выборки; $n - 1 = nf$ – число степеней свободы.

3. По зависимости (рис. 5.47) определяют коэффициент Стьюдента c :

$$c = f(P, \%, nf).$$

4. Определяют доверительные границы погрешности средней величины \bar{x} :

$$E_{\text{апр}, \%} = \pm \frac{c}{\sqrt{n}} \cdot S.$$

5.5.8. Систематическая погрешность

Систематическая погрешность E_s по определению равна:

$$E_s = \mu - x,$$

где μ – математическое ожидание показания; x – истинное значение.

Как уже отмечалось, значение μ практически не может быть точно определено и поэтому заменяется оценкой \bar{x} – средним зна-

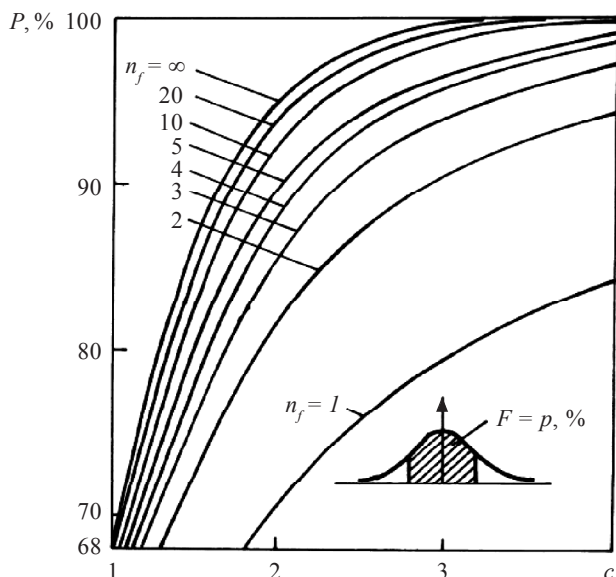


Рис. 5.47. Схема t -распределения Стьюдента:

P – вероятность события $t \leq c$; n_f – число степеней свободы

чением измерительных величин, полученных при независимых повторных измерениях одной и той же величины:

$$E_s \approx \bar{x} - x.$$

В связи с тем, что систематическая погрешность является воспроизводимой, ее можно определить при поверке и учесть при проведении измерений.

Так как точно определено может быть только среднее значение, а не математическое ожидание μ , то градуировочная зависимость имеет смысл лишь в том случае, если результирующая случайная погрешность определения среднего значения при градуировке существенно меньше, чем систематическая погрешность. Поэтому градуировка по одиночному измерению без априорного знания случайной погрешности или доверительного интервала лишена смысла.

Доверительный интервал среднего значения в данном случае необходимо проверить по методике, описанной выше.

Если используемые при градуировке меры или приборы сравнения имеют значительное рассеяние, то результирующая погрешность должна определяться на основе законов распространения погрешности.

5.5.9. Распространение погрешностей

Если результат измерения определяется на основе математической обработки отдельных измеряемых величин, то погрешность вводится и в этот результат. Поэтому говорят о распространении погрешности. Различным структурам систематических и случайных погрешностей соответствуют разные законы распространения погрешностей.

Систематические погрешности. Результат измерения y определяется по m различным измеренным величинам x_i . В статике эта связь в общем виде описывается уравнением

$$y = f(x, \dots, x_i, \dots, x_m).$$

При малых отклонениях отдельных измеренных величин результирующее отклонение можно рассчитать, используя ряд Тейлора:

$$\Delta y \cong -\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m.$$

Если под малыми отклонениями Δx_i понимать систематическую погрешность E_{sx_i} , т. е. отклонение от действительного значения, то систематическая погрешность результата измерения определяется по следующей формуле:

$$E_{se} = \frac{\partial f}{\partial x_1} E_{sx_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} E_{sx_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} E_{sx_m}.$$

Следует отметить, что систематическая погрешность может иметь знак плюс или минус, вследствие чего возникает возможность ее компенсации.

Особое значение для требований, предъявляемых к систематическим погрешностям, имеют частные производные $\partial f / \partial x_i$. Эти коэффициенты воздействия, или весовые коэффициенты, показывают, с каким весом отдельные систематические погрешности участвуют в образовании систематической погрешности результата измерения.

Случайные погрешности. Случайная погрешность, рассматриваемая как единичное явление, по своей природе не может быть предсказана заранее. Однако можно высказать суждение о ее статистических свойствах. При нормальном распределении погрешности среднее квадратичное отклонение σ является мерой, характеризующей плотность распределения погрешности. Поэтому вопрос о распространении погрешности сводится к способу распространения статистической характеристики σ или доверительных границ. В этом случае требуется определить среднее квадратичное отклонение σ_y результата измерения $y = f(x_1, \dots, x_m)$ при известных среднее квадратичных отклонениях σ_{x_i} влияющих величин x_i .

Если отдельные влияющие величины взаимно независимы и для среднее квадратичных отклонений справедливо неравенство $\sigma_i \ll x_i$, то σ_y можно вычислить по следующей формуле:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \sigma_{x_m}\right)^2}.$$

Если вместо среднее квадратичных отклонений σ_{x_i} представить их оценки – рассеяния S_{x_i} , то получим соотношение (правда, не строгое) для определения S_y результата измерения:

$$S_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} S_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} S_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} S_{x_m}\right)^2}.$$

Для увеличения точности расчета результата измерения можно использовать средние значения влияющих величин:

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m).$$

Если для усреднения каждой из m влияющих величин использованы по n значений, то среднеквадратичное отклонение или рассеяние уменьшается согласно (5.72):

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_y \quad \text{или} \quad S_{\bar{y}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_y.$$

Если рассеяние S_{x_i} влияющих величин заранее неизвестно, то можно определить его одновременно с усреднением x_i , используя те же n значений. Доверительные границы погрешности среднего результата измерения определяют по формуле

$$E_{\bar{y}P}, \% = \pm \frac{c}{\sqrt{n}} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} S_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} S_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} S_{x_m}\right)^2}.$$

Величину c определяют для выбранной доверительной вероятности P (%) и при числе степеней свободы $n_f = n - 1$.

Предел погрешности. Предел погрешности применяют для задания максимального гарантированного значения погрешности. Этот предел содержит как оцененную систематическую, так и случайную погрешность. Пределы погрешностей отдельных измеренных величин могут иметь положительные, отрицательные или неопределенные знаки. При неопределенных знаках предел погрешности результата измерения определяется суммированием абсолютных величин пределов погрешности отдельных измеренных значений:

$$E_{gy} = \pm \left\{ \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} E_{gx_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} E_{gx_2} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_m} E_{gx_m} \right| \right\}.$$

Если знаки пределов погрешности измеренных величин известны, то положительный и отрицательный пределы погрешности результата измерения вычисляются отдельно:

$$E_{gy_{\text{отп}}} = \frac{\partial f}{\partial x_i} E_{gx_i} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_j} E_{gx_j}; \quad \frac{\partial f}{\partial x} E_{gx} \leq 0;$$

$$E_{g'_{\text{пол}}} = \frac{\partial f}{\partial x_i} E_{g_{x_i}} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_s} E_{g_{x_s}}; \quad \frac{\partial f}{\partial x} E_{g_x} \geq 0.$$

5.5.10. Грубые погрешности измерения и их отсеивание

Если большой ряд измерений или выборку привлекают для дальнейшей обработки, то каждый раз возникает вопрос, не содержит ли этот ряд ошибочных измерений. Ответ на этот вопрос может быть получен следующим образом:

1. Предполагают, что различия в измерениях обусловлены случайными погрешностями. Обычно эти погрешности имеют нормальное распределение.

2. По измеренным значениям определяют характеристики распределения. Для нормального распределения такими характеристиками являются средняя величина \bar{x} и рассеяние S .

3. Выбирают доверительную вероятность, например, 95 %.

4. Для предполагаемого нормального распределения с $\mu = \bar{x}$ и $\sigma = S$ можно (см. рис. 5.46) определить доверительный интервал при выбранной доверительной вероятности. Например, при доверительной вероятности 95 % интервал равен $\pm 1,96\sigma$. Это означает, что только в 2,5 % всех случаев значения $\bar{x} > \bar{x} + 1,96S$ и в 2,5 % всех случаев – значения $\bar{x} < \bar{x} - 1,96S$.

5. Для измеренных величин, лежащих вне доверительного интервала, отвергаем гипотезу об их принадлежности генеральной совокупности, имеющей предполагаемое нормальное распределение, так как вероятность появления таких значений мала. Эти величины мы рассматриваем как грубую погрешность (выброс). Мы предполагаем, что их появление обусловлено не случайной, а какой-либо систематической погрешностью (например, ошибкой в отсчете или воздействием помех).

6. После исключения грубой погрешности рассчитывают исправленные оценки \bar{x} и S .

6. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Анализ полученных данных представляет важнейшую часть любого исследования, в связи с чем его выполнение осуществляется, как правило, наиболее опытным специалистом (обычно это сам руководитель темы). При этом выявление новых фактов и закономерностей является в значительной мере творческим процессом, который не может быть полностью формализован. Для того чтобы заметить проявление какого-либо нового эффекта, отличить его от ошибки эксперимента, исследователь должен обладать достаточно высоким профессионализмом и нередко способностью мыслить нестандартными категориями. Тем не менее многолетняя практика проведения исследований показывает, что, несмотря на все многообразие используемых подходов, можно выделить довольно много общих правил и практических приемов, применимых к любым исследованиям. Такие правила если и не решают полностью поставленных задач, то по крайней мере существенно упрощают такие решения. Это особенно проявляется в исследованиях, относящихся к одному и тому же виду наук (технических, экономических, биологических и т. д.). Далее приводятся наиболее типичные приемы обработки экспериментальных данных, характерные для исследований количественного характера, т. е. связанных с использованием математических моделей, результатов измерений, наблюдений и т. д.

Первым этапом анализа полученных данных, как правило, является их систематизация путем сопоставления теоретических и экспериментальных зависимостей на начальном этапе анализа. Производится предварительная визуальная оценка построенных графиков, выдвигаются соответствующие гипотезы, намечаются дальнейшие этапы анализа. Обычно на этом этапе исследователь строит двумерные графики.

Как уже отмечалось, при анализе результатов экспериментов необходима особая осторожность и беспристрастность в оценках получаемых данных. Подтверждают или опровергают полученный результат эксперимента взгляды самого экспериментатора, внимание к такому результату должно быть одинаковым, особенно при малом числе таких данных.

Основная проблема первых этапов анализа экспериментальных данных в том, что отличить закономерность от случайности во многих случаях очень трудно. Для того чтобы свести к минимуму ошибки подобного типа, т. е. правильно интерпретировать экспериментальные данные и не перепутать случайность с закономерностью, используются методы математической статистики.

6.1. Общие принципы математической статистики

М а т е м а т и ч е с к а я с т а т и с т и к а – математическая дисциплина, в которой рассматриваются методы сбора, систематизации и анализа результатов измерений или наблюдений в условиях воздействия случайных факторов. Ее раздел, охватывающий вопросы оценки точности приближенных измерений, анализа возникающих погрешностей, называется теорией ошибок. Для экспериментатора важно не столько знать методику статистических расчетов, сколько понимать их смысл и уметь правильно истолковывать получаемые результаты расчетов.

В современных условиях это имеет особое значение, так как статистические расчеты все в большей мере выполняются на компьютере. В этих случаях роль исследователя сводится к выбору компьютерных программ, вводу исходных данных (результатов эксперимента) и анализу получаемых результатов компьютерных расчетов.

Основным понятием математической статистики является случайная величина, которая в отличие от постоянной (неслучайной) величины при каждом определении может иметь различные частные значения. Тем не менее эти частные значения (иначе конкретные

реализации случайной величины) хотя и носят случайный характер, в целом в своей совокупности подчиняются определенному закону, именуемому законом распределения случайной величины. Такой закон отражает вероятность попадания того или иного частного значения в конкретный интервал возможных значений рассматриваемой случайной величины.

Понятие случайной величины имеет большое практическое значение при анализе экспериментальных данных, так как любой исследуемый фактор проявляется (количественно) как случайная величина через свои частные значения, т. е. через результаты конкретных измерений. Так, изучение того или иного свойства материала путем анализа результатов испытаний его образцов (проб) различными методами представляет типичный пример оценки случайной величины.

При малом числе исходных данных принятие того или иного закона распределения, как правило, особого значения не имеет, т. е. одни и те же математические приемы оказываются пригодными для многих распределений. Когда число результатов не превышает 10–15, исследователь обычно не задумывается над такими вопросами и использует наиболее известные приемы статистических расчетов.

В связи с тем, что случайную величину нельзя охарактеризовать подобно постоянной величине одним числом, любые действия со случайными величинами (сравнение их друг с другом, установление зависимостей, сложение, вычитание, деление, умножение и пр.) приходится выполнять по более сложным правилам, нежели действия с постоянными величинами. Математики разработали способы оценки, сравнения, выполнения различных операций со случайными величинами, а исследователи в области прикладных наук (в первую очередь технических, экономических и др.) используют их готовые решения в качестве математических моделей при обработке своих экспериментальных данных. Некоторые специалисты выделяют даже так называемый рутинный подход к использованию математической статистики, предполагающий выполнение статистических расчетов как некоего шаблона, не требующего вникать

в математическую сущность. К таковым относят, например, расчеты, приводимые в стандартах по обработке результатов испытаний, различные инструкции для специалистов-производственников, контролирующих качество продукции, и т. д. Такой подход, как правило, приемлем в практической деятельности, но в научных исследованиях он нежелателен, ибо ошибочный вывод при анализе результатов экспериментов может обесценить всю проведенную работу.

В математической статистике рассматривается очень широкий круг задач, связанных с изучением поведения случайных величин и случайных функций. Практически для любой ситуации, возникающей при анализе экспериментальных данных, можно найти подходящее решение статистической задачи (часто не единственной). Однако для такого выбора экспериментатор должен обладать определенными навыками использования статистических методов. Попытки перекладывания такого выбора на математика являются для экспериментатора грубой ошибкой, ибо математик силен в решениях, но не в постановках таких задач. Для него всегда наибольшую трудность представляет физический смысл получаемых результатов, а неточности в понимании смысла очень часто становятся источниками ошибок. Как правило, оптимальным является тесная совместная работа экспериментатора с математиком, даже когда последний выступает лишь в роли специалиста по компьютерным (статистическим) программам.

В рамках настоящего пособия содержание математической статистики подробно не рассматривается, ибо это отдельный предмет, требующий серьезного внимания. Начинающий исследователь должен изучить его, используя специальную литературу, которая в настоящее время имеется в достаточном количестве.

6.2. Оценка выборок

В экспериментальных исследованиях часто приходится сравнивать одну совокупность данных с другой, выясняя, есть ли между ними различия. Например, сравниваются результаты испытаний

образцов какого-либо материала с аналогичными результатами испытаний другого материала. Или сравнивается производительность землеройных машин, оснащенных каким-либо дополнительным приспособлением, с производительностью аналогичных машин без такового приспособления и т. д. Выражаясь языком математической статистики, решается задача о принадлежности двух сравниваемых выборок одной и той же генеральной совокупности. При этом предположение об отсутствии различия между выборками именуется «нулевой гипотезой».

Существует множество способов решения такой задачи, соответствующих различным условиям. В технических исследованиях чаще всего проводятся сравнения параметров распределений сравниваемых выработок – средних значений и дисперсий. Имеются специальные формулы и таблицы, позволяющие делать такие сравнения, т. е. оценивать «значимость» получаемых различий.

6.3. Проведение эксперимента и обработка его результатов

После выбора плана эксперимента, основных уровней и интервалов варьирования факторов переходят к эксперименту. Каждая строка матрицы – это условия эксперимента. Для исключения систематических ошибок рекомендуется эксперименты, предусмотренные матрицей, проводить в случайной последовательности. Порядок проведения следует выбирать по таблице случайных чисел (табл. 6.1). Например, если требуется провести восемь экспериментов, то из случайного места таблицы последовательно выписывают числа, лежащие в интервале от 1 до 8, при этом не учитываются уже выписанные и числа больше восьми. Так, например, начиная с числа 87 (1-я строка табл. 6.1) получаем следующую последовательность реализации экспериментов:

Номер опыта в матрице	1	2	3	4	5	6	7	8
Порядок экспериментов	7	2	8	3	1	4	5	6

Т а б л и ц а 6.1

Фрагмент таблицы случайных чисел

87	63	88	23	62	51	0,7	69	59	02	89	49	14	98	53	41	92	36
07	76	85	37	84	37	47	32	25	21	15	08	82	34	57	57	35	22
03	33	48	84	37	37	29	38	37	89	76	25	09	69	44	61	88	23
13	01	59	47	64	04	99	59	96	20	30	87	31	33	69	45	58	48
00	83	48	94	44	08	67	79	41	61	41	15	60	11	88	83	24	82
24	07	78	61	89	42	58	88	22	16	13	24	40	09	00	65	46	38
61	12	90	62	41	11	59	85	18	42	61	29	88	76	04	21	80	78
27	84	05	99	85	75	67	80	05	57	05	71	70	21	31	99	99	06
96	53	99	25	13	63												

Для компенсации влияния случайных погрешностей каждый эксперимент рекомендуется повторить n раз. Эксперименты, повторенные несколько раз при одних и тех же значениях факторов, называют параллельными. Под дублированием понимают постановку параллельных экспериментов. Обычно число n параллельных экспериментов принимают равным 2–3, иногда – 4–5. При проведении исследований приходится иметь дело с тремя вариантами дублирования экспериментов: 1) с равномерным дублированием; 2) с неравномерным дублированием; 3) без дублирования.

При равномерном дублировании все строки матрицы планирования имеют одинаковые числа параллельных экспериментов. В случае неравномерного дублирования числа параллельных экспериментов неодинаковы. При отсутствии дублирования параллельные эксперименты не проводятся. Наиболее предпочтительным из трех вариантов дублирования является первый. При этом варианте эксперимент отличается повышенной точностью, а математическая обработка экспериментальных данных – простотой. Характер дублирования влияет на содержание математической обработки результатов наблюдений. Рассмотрим методику обработки результатов эксперимента для каждого из трех вариантов дублирования.

Обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании. Для каждой строки матрицы планирования по результатам n параллельных экспериментов находят \bar{y}_j среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju},$$

где u – номер параллельного эксперимента; y_{ju} – значение параметра оптимизации в u -м параллельном эксперименте j -й строки матрицы.

С целью оценки отклонений параметра оптимизации от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляют дисперсию s_j^2 эксперимента по данным n параллельных экспериментов. Статистической дисперсией называют среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2. \quad (6.1)$$

Ошибка s_j эксперимента определяется как корень квадратный из дисперсии:

$$s_j = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2}.$$

В этом случае ошибка при большом рассеянии будет значительной. Рассеяние результатов эксперимента определяется влиянием неуправляемых факторов, погрешностями измерений и другими причинами. Большое рассеяние изучаемой величины может произойти из-за наличия в эксперименте сомнительных результатов. Для проверки сомнительных, т. е. резко выделяющихся результатов, используют специальные критерии; одним из таких критериев является отношение U (ГОСТ 11.002–73). Чтобы оценить принадлежность резко выделяющихся результатов $y_{j\max}$ или $y_{j\min}$

к данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении их в составе выборки, находят отношение

$$U_{\max} = \frac{y_{j\max} - \bar{y}_j}{s_j} \quad \text{или} \quad U_{\min} = \frac{\bar{y}_j - y_{j\min}}{s_j},$$

где $y_{j\max}$ – наибольшее значение параметра оптимизации среди его значений, полученных в n параллельных экспериментах j -й строки матрицы планирования; $y_{j\min}$ – наименьшее значение параметра оптимизации среди его значений, полученных в n параллельных экспериментах j -й строки матрицы планирования.

Результат сравнивают с величиной β , взятой из ГОСТ 11.002–73 (табл. 1) для числа n параллельных экспериментов и принятого уровня значимости α . Число n параллельных экспериментов и объем выборки n в рассматриваемом случае – понятия равноценные. Если $U_{\max} \geq \beta$, то сомнительный результат может быть исключен, в противном случае его считают нормальным и не исключают.

Аналогично производится оценка результата $y_{j\min}$: если $U_{\max} \geq \beta$, то сомнительный результат признают аномальным; при $U_{\min} < \beta$ подозреваемый в аномальности результат считают нормальным. Чтобы числа параллельных экспериментов были одинаковы во всех строках матрицы, необходимо повторить те, результаты которых были признаны аномальными. В математической статистике для проверки гипотез пользуются критериями согласия. Для того чтобы принять или забраковать гипотезу при помощи этих критериев, устанавливают уровни их значимости. Уровень значимости представляет собой достаточно малое значение вероятности, отвечающее событиям, которые в данной обстановке исследования можно считать практически невозможными.

Обычно принимают 5-, 2- или 1%-ный уровень значимости. В технике чаще всего принимают 5%-ный уровень. Уровень значимости α называют также уровнем риска или доверительным уровнем вероятности, который соответственно может быть принят равным 0,05; 0,02 или 0,01. Так, например, при уровне значимости (риска) $\alpha = 0,05$ вероятность P верного ответа при проверке нашей

гипотезы $P = 1 - \alpha = 1 - 0,05 = 0,95$, или 95 %. Это значит, что в среднем только в 5 % случаев возможна ошибка при проверке гипотезы. После вычисления по формуле (6.1) дисперсий проверяют гипотезу их однородности. Проверка однородности двух дисперсий производится с помощью F -критерия Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2},$$

где $s_1^2 > s_2^2$.

Если наблюдаемое значение F_p -критерия меньше табличного F_T (табл. 6.2) для соответствующих чисел степеней свободы и принятого уровня значимости, то дисперсии однородны. Однородность ряда дисперсий проверяют по критерию Кохрена или по критерию Бартлета. При равномерном дублировании экспериментов однородность ряда дисперсий проверяют с помощью G -критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_N^2} = s_{\max}^2 / \sum_{j=1}^N s_j^2.$$

Дисперсии однородны, если расчетное значение G_p -критерия не превышает табличного значения G_T -критерия. В табл. 6.3 N показывает число сравниваемых дисперсий, а n – число параллельных опытов. Если $G_p > G_T$, то дисперсии неоднородны, а это указывает на то, что исследуемая величина y не подчиняется нормальному закону. В этом случае нужно попытаться заменить y случайной величиной $q = f(y)$, достаточно близко следующей нормальному закону. Если дисперсии s_j^2 экспериментов однородны, то дисперсию s_y^2 воспроизводимости вычисляют по зависимости

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2, \quad (6.2)$$

где N – число экспериментов или число строк матрицы планирования.

Значения *F*-критерия Фишера при 5 %-ном уровне значимости

Число степеней свободы для меньшей дисперсии	Значения критерия при числе степеней свободы для большей дисперсии								
	1	2	3	4	5	6	12	24	≈
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	224,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1

Число степеней свободы для меньшей дисперсии	Значения критерия при числе степеней свободы для большей дисперсии									
	1	2	3	4	5	6	12	24	≈	
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0	
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0	
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9	
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9	
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8	
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8	
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7	
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7	
28	4,2	3,3	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7	
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6	
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5	
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4	
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3	
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0	

По результатам эксперимента вычисляют коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяют по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j. \quad (6.3)$$

Т а б л и ц а 6.3

Значения G -критерия при 5 %-ном уровне значимости

N	$n - 1$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439
12	0,5410	0,3924	0,3624	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляют по зависимости

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j. \quad (6.4)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяют по формуле

$$b_{il} = \frac{l}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} \bar{y}_j, \quad (6.5)$$

где i, l – номера факторов; x_{ij}, x_{lj}, y_j – кодированные значения факторов i в j -м эксперименте. Формулы (6.3)–(6.5) получены в результате использования метода наименьших квадратов.

Коэффициенты b_0, b_i, b_{ij} – это оценки теоретических коэффициентов $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ регрессии. Оценки, найденные с помощью метода наименьших квадратов, являются наилучшими в том смысле, что они распределены нормально со средними значениями, равными теоретическим коэффициентам, и с наименьшими возможными дисперсиями. Вычислив коэффициенты модели, проверяют их значимость. Проверку значимости коэффициентов можно производить двумя способами: 1) сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом; 2) с помощью t -критерия Стьюдента.

При проверке значимости коэффициентов первым способом для определения доверительного интервала вычисляют дисперсии коэффициентов регрессии. Дисперсию $s^2\{b_i\}$ i -го коэффициента определяют по зависимости

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{nN} s_y^2. \quad (6.6)$$

Доверительный интервал Δb_i находят по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_\tau s\{b_i\}, \quad (6.7)$$

где t_τ – табличное значение критерия при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f , с которым определялась дисперсия s_y^2 ; при равномерном дублировании экспериментов число степеней свободы находится по зависимости $f = (n - 1)N$, где N – число экспериментов в матрице планирования, а n – число параллельных экспериментов; $s\{b_i\}$ – ошибка в определении i -го коэффициента регрессии, вычисляемая по формуле $s\{b_i\} = +\sqrt{s^2\{b_i\}}$. Значения t приведены в табл. 6.4.

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При проверке значимости коэффициентов вторым способом вычисляют t_p -критерий по зависимости

$$t_p = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}}$$

Значения t -критерия при 5 %-ном уровне значимости

Число степеней свободы	1	2	3	4	5	6	7	8
Значения t	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,30
Число степеней свободы	9	10	11	12	13	14	15	16
Значения t	2,26	2,23	2,20	2,18	2,16	2,14	2,13	2,12
Число степеней свободы	17	18	19	20	21	22	23	24
Значения t	2,11	2,10	2,09	2,09	2,08	2,07	2,07	2,06
Число степеней свободы	25	26	27	28	29	30	40	60
Значения t	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04	2,02	2,00

и сравнивают его с табличным t_{τ} . Коэффициент значим, если $t_p > t_{\tau}$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, с которым определялась дисперсия s_y^2 . Критерий Стьюдента t вычисляют для каждого коэффициента регрессии. Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения. После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяют дисперсию $s_{ад}^2$ адекватности. Остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности, характеризует рассеяние эмпирических значений y относительно расчетных \hat{y} , определенных по найденному уравнению регрессии. Дисперсию адекватности определяют по формуле

$$s_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (6.8)$$

где \bar{y}_j – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в j -м эксперименте; \hat{y}_j – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j -го опыта; f – число степеней свободы, равное $N - (k + 1)$; k – число факторов.

Последним этапом обработки результатов эксперимента является проверка гипотезы адекватности найденной модели. Проверку этой гипотезы производят по F -критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2}. \quad (6.9)$$

Если значение $F_p < F_\tau$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_p > F_\tau$ гипотеза адекватности отвергается. Таким образом, обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании экспериментов может быть представлена следующей схемой:

- 1) для каждой строки матрицы планирования по формуле $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}$ вычисляют среднее арифметическое значение \bar{y}_j параметра оптимизации;
- 2) по формуле (6.1) определяют дисперсию s_j^2 каждого опыта матрицы планирования;
- 3) используя критерий Кохрена, проверяют гипотезу однородности дисперсий s_j^2 опытов;
- 4) если дисперсии опытов однородны, то по формуле (6.2) вычисляют дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента;
- 5) по формулам (6.3)–(6.5) определяют коэффициенты уравнения регрессии;
- 6) по зависимости (6.6) находят дисперсии $s_2\{b_i\}$ коэффициентов регрессии;
- 7) по формуле (6.7) устанавливают величину доверительного интервала Δb_i ;
- 8) проверяют статистическую значимость коэффициентов регрессии;
- 9) по зависимости (6.8) определяют дисперсию $s_{\text{ад}}^2$ адекватности;
- 10) с помощью F -критерия проверяют гипотезу адекватности модели.

В заключение необходимо отметить, что использование критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера предполагает нормальное распределение результатов эксперимента.

Обработка результатов эксперимента при неравномерном дублировании. Результаты отдельных экспериментов иногда получаются ошибочными, и их приходится исключать. Вследствие этого числа параллельных экспериментов оказываются неодинаковыми. Бывают и другие случаи, когда по тем или иным причинам не удастся провести одинаковое число параллельных экспериментов в каждом из основных. При неодинаковых числах параллельных экспериментов нарушается ортогональность матрицы планирования и, как следствие, изменяются формулы для определения коэффициентов регрессии и их ошибок. Расчет коэффициентов регрессии и их ошибок при неодинаковых числах параллельных опытов усложняется.

Обработка результатов эксперимента при неравномерном дублировании производится по следующей схеме:

1. Для каждой строки матрицы планирования находят \bar{y}_j – среднее арифметическое значение параметра оптимизации:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{u=1}^{n_j} y_{ju},$$

где n_j – число параллельных экспериментов в j -й строке матрицы.

2. Для каждой строки матрицы вычисляют дисперсию s_j^2 эксперимента:

$$s_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{u=1}^{n_j} (y_{ju} - \bar{y}_j)^2.$$

3. Проверяют с помощью критерия Бартлета гипотезу однородности дисперсий. Для этого подсчитывают дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента по формуле

$$s_y^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^N f_j} \left(\sum_{j=1}^N s_j^2 f_j \right),$$

где f_j – число степеней свободы, с которым определялась дисперсия s_j^2 i -го эксперимента.

После этого определяют величину

$$Q = \frac{1}{c} \left\{ f \lg s_y^2 - \sum_{j=1}^N f_j \lg s_j^2 \right\},$$

где $c = 0,4343 \left[1 + \frac{1}{3(N-1)} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} - \frac{1}{f} \right) \right]$; $f = \sum_{j=1}^N f_j$.

Бартлет показал, что величина Q приближенно подчиняется χ^2 -распределению с $(N-1)$ степенями свободы, где N – число сравниваемых дисперсий.

Если Q меньше χ^2_{α} (табл. 6.5) для данного числа $(N-1)$ степеней свободы и принятого уравнения значимости, то дисперсии однородны, и наоборот. Критерий Бартлета основан на нормальном распределении. Если распределение случайной величины не подчиняется нормальному закону, то проверка однородности дисперсий может привести к ошибочным результатам.

Т а б л и ц а 6.5

Значения χ^2 при 5 %-ном уровне значимости

Число степеней свободы	Значения χ^2	Число степеней свободы	Значения χ^2
1	3,84	10	18,31
2	5,99	11	19,68
3	7,82	12	21,0
4	9,49	13	22,4
5	11,07	14	23,7
6	12,59	15	25,0
7	14,07	16	26,3
8	15,51	17	27,6
9	16,92	18	28,9

Число степеней свободы	Значения χ^2	Число степеней свободы	Значения χ^2
19	30,1	25	37,7
20	31,4	26	38,9
21	32,7	27	40,1
22	33,9	28	41,3
23	35,2	29	42,6
24	36,4	30	43,8

Рассмотрим применение критерия Бартлетта для проверки однородности дисперсий. Матрица планирования предусматривала выполнение четырех экспериментов. Первый был повторен пять раз, второй – шесть, третий и четвертый – по четыре раза. При этом дисперсия первого эксперимента равна 3,5; второго – 4,22; третьего – 5,88; четвертого – 11,36. Необходимо проверить, верна ли гипотеза об однородности дисперсий.

Дисперсия s_y^2 параметра оптимизации

$$s_y^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^N f_j} \left(\sum_{j=1}^N s_j^2 f_j \right) = \frac{3,5 \cdot 4 + 4,22 \cdot 5 + 5,88 \cdot 3 + 11,36 \cdot 3}{15} = 5,79.$$

Вычисляем величину c :

$$c = 0,4343 \left[1 + \frac{1}{3(4-1)} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{1}{15} \right) \right] = 0,485.$$

Определяем Q :

$$Q = \frac{1}{c} \left\{ f \lg s_y^2 - \sum_{j=1}^N f_j \lg s_j^2 \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,485} (15 \lg 5,79 - 4 \lg 3,5 - 5 \lg 4,22 - 3 \lg 5,88 - 3 \lg 11,36) = 1,37.$$

Табличное значение χ^2_{τ} для трех степеней свободы ($N - 1 = 3$) и 5 % уровня значимости равно 7,82. Так как $Q < \chi^2_{\tau}$, то гипотеза однородности дисперсий принимается.

4. Вычисляют коэффициенты b_i уравнения регрессии, дисперсии $s^2\{b_i\}$ коэффициентов регрессии и ошибки $s\{b_i\}$ в определении коэффициентов.

5. Для каждого коэффициента регрессии находят расчетное значение t -критерия:

$$t_p = \frac{\{b_i\}}{s\{b_i\}}.$$

Сравнивают расчетное значение t_p с табличным значением t_{τ} критерия. Табличное значение критерия находят для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f , которое в рассматриваемом случае определяют по зависимости

$$f = \sum_{j=1}^N f_j = \sum_{j=1}^N (n_j - 1).$$

Коэффициент значим при $t_p > t_{\tau}$ и незначим при $t_p < t_{\tau}$. Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения регрессии. При исключении статистически незначимых коэффициентов из уравнения оставшиеся коэффициенты пересчитывают с использованием метода наименьших квадратов.

6. Определяют дисперсию адекватности:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N n_j (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^N n_j (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)},$$

где n_j – число параллельных экспериментов в j -й строке матрицы.

7. Проверяют гипотезу адекватности полученной модели с помощью F -критерия, используя для этого формулу (6.9). Если $F_p < F_{\tau}$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_p > F_{\tau}$ гипотеза адекватности отвергается.

Обработка результатов эксперимента при отсутствии дублирования. Обработку результатов эксперимента в этом случае производят по следующей схеме.

1. Для вычисления дисперсии s_y^2 воспроизводимости эксперимента выполняют несколько параллельных опытов в нулевой точке (в центре плана). При постановке опытов в нулевой точке все факторы находятся на нулевых уровнях. По результатам исследований в центре плана вычисляют дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \left[\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 \right],$$

где n_0 – число параллельных экспериментов в нулевой точке; y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте; \bar{y} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 параллельных экспериментах.

2. Закончив эксперимент, вычисляют коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяют по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляют по зависимости

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяют по формуле

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j,$$

где i, l – номера факторов; j – номер строки или опыта в матрице планирования; y_j – значение параметра оптимизации в j -м опыте; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения (± 1) факторов i и l в j -м опыте.

3. Проверяют статистическую значимость коэффициентов уравнения регрессии. Проверку значимости коэффициентов можно производить двумя способами: 1) сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом; 2) с помощью t -критерия.

При проверке значимости коэффициентов первым способом для определения доверительного интервала вычисляют дисперсии коэффициентов регрессии по зависимости

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{N} s_y^2, \quad (6.10)$$

где $s^2\{b_i\}$ – дисперсия i -го коэффициента регрессии; N – число строк или опытов в матрице планирования.

Из формулы (6.10) следует, что дисперсии всех коэффициентов равны. Доверительный интервал Δb_i определяют по формуле (6.7). Значение t -критерия, входящего в эту формулу, находят по таблице для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f , которое определяют по зависимости $f = n_0 - 1$. Коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При проверке значимости коэффициентов вторым способом вычисляют критерий t_p :

$$t_p = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}}$$

и сравнивают его с табличным t_t . Коэффициент значим, если $t_p > t_t$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы, определенного по формуле $f = n_0 - 1$. Критерий Стьюдента t вычисляют для каждого коэффициента регрессии. Статистически незначимые коэффициенты регрессии могут быть исключены из уравнения.

4. Определяют дисперсию $s_{\text{ад}}^2$ адекватности по формуле

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)},$$

где y_j – наблюдаемое значение параметра оптимизации в j -м эксперименте; \hat{y}_j – значение параметра оптимизации, вычисленное по модели для условий j -го эксперимента; f – число степеней свободы, которое для линейной модели определяется по зависимости $f = N - (k + 1)$, где k – число факторов.

5. Проверяют гипотезу адекватности модели по F -критерию, используя для определения F_p -критерия формулу (6.9).

Если $F_p < F_{\tau}$ для принятого уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы, то модель считают адекватной. При $F_p > F_{\tau}$ гипотеза адекватности отвергается. В этом случае для получения адекватной модели принимают одно из следующих решений: 1) переходят к планированию второго или более высокого порядка; 2) уменьшают интервалы варьирования и ставят новый эксперимент, повторяя эти действия до получения адекватной линейной модели.

Если линейная модель адекватна, то переходят к методу крутого восхождения. Необходимо заметить, что крутое восхождение эффективно тогда, когда все коэффициенты при факторах значимы. Незначимость некоторых коэффициентов может получиться вследствие неудачно выбранных интервалов варьирования; включения факторов, не влияющих на параметр оптимизации; большой ошибки эксперимента.

Принятие решения в данной ситуации зависит от того, какая из трех гипотез выбрана. Если принята первая гипотеза, то изменяют интервалы варьирования по незначимым факторам и ставят новую серию экспериментов. Если принята вторая, то не влияющие факторы стабилизируют и исключают из экспериментов. Если принята третья гипотеза, то увеличивают число параллельных экспериментов. Увеличение их числа приводит к уменьшению дисперсии коэффициентов и величины доверительного интервала,

в результате все или часть коэффициентов могут оказаться значимыми. Возможен случай, когда все коэффициенты, кроме b_0 , незначимы, а модель адекватна. Такая ситуация чаще всего возникает из-за слишком узких интервалов варьирования или вследствие большой ошибки эксперимента. В этой ситуации возможны два решения: 1) расширение интервалов варьирования или 2) повышение точности эксперимента путем улучшения методики проведения и увеличения числа параллельных экспериментов.

6.4. Крутое восхождение по поверхности отклика

Г р а д и е н т о м называют вектор, показывающий направление наискорейшего изменения некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой. Градиент ($\nabla\varphi$) непрерывной однозначной функции φ есть вектор:

$$\nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} \bar{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} \bar{j} + \dots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_k} \bar{k},$$

где $\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}$ – частная производная функции по i -му фактору; $\bar{i}, \bar{j}, \dots, \bar{k}$ – единичные векторы и направления осей факторов.

Согласно теореме Тейлора о разложении аналитической функции в ряд, частные производные функции по факторам равны по величине и знаку соответствующим коэффициентам регрессии. Следовательно, градиент ∇y функции отклика y есть вектор:

$$\nabla y = b_1 \bar{i} + b_2 \bar{j} + \dots + b_k \bar{k}.$$

Движение по градиенту обеспечивает наиболее короткий путь к оптимуму, так как направление градиента – это направление самого крутого склона, ведущего от данной точки к вершине.

Если изменять факторы пропорционально их коэффициентам с учетом знака, то движение к оптимуму будет осуществляться по самому крутому пути. Этот процесс движения к области опти-

мума называют крутым восхождением. Технику расчета крутого восхождения рассмотрим на примере задачи с одним фактором x_1 (рис. 6.1).

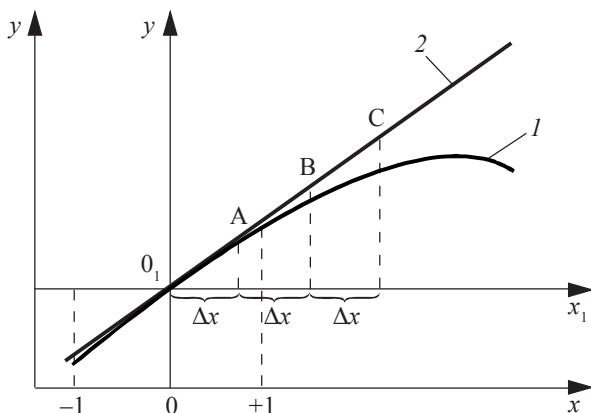


Рис. 6.1. Схема к расчету координат точек в направлении градиента:

1 – график неизвестной функции; 2 – прямая $y = b_0 + b_1 x_1$ – направление градиента

Предположим, что кривая 1 представляет собой неизвестную функцию отклика. В результате реализации плана эксперимента с центром в точке 0 получено уравнение регрессии $y = b_0 + b_1 x_1$, адекватно описывающее функцию отклика в области значений фактора x_1 от -1 до $+1$. Значение коэффициента регрессии b_1 равно тангенсу угла между линией регрессии и осью данного фактора. Если шаг движения по оси x_1 принять равным Δx , то, умножив его на b_1 , получим координаты $(\Delta x$ и $b_1 \Delta x)$ точки А, лежащей на градиенте. После второго шага расстояние по оси x_1 будет равно $2\Delta x$. Умножив $2\Delta x$ на b_1 , найдем координаты $2\Delta x$ и $2b_1 \Delta x$ точки В, лежащей на градиенте, и т. д. Затем проводят эксперименты с условиями, отвечающими точкам на градиенте. По результатам этих экспериментов определяют область оптимума. В практических задачах для сокращения объема эксперимента проводят не все, а только часть экспериментов, предусмотренных крутым восхождением. Условия проведения выбирают так, чтобы область оптимума можно было заключить в «вилку». После этого эксперименты

проводят в точках интервала, образованного точками «вилки», до нахождения наилучшего результата.

В случае k факторов расчет крутого восхождения по оси каждого фактора производят аналогичным образом, так как коэффициенты b_i определяются независимо друг от друга. При этом движение по осям всех факторов осуществляют одновременно.

Шаг движения по градиенту выбирают таким, чтобы его минимальная величина была больше ошибки, с которой фиксируют фактор. Максимальную величину шага ограничивает область определения фактора. Необходимо учитывать, что при движении к оптимуму малый шаг потребует значительного числа экспериментов, а большой шаг может принести к проскоку области оптимума. Шаг движения выбирают для одного фактора, а для остальных его рассчитывают по зависимости

$$\Delta_i = \Delta_l \frac{b_l \varepsilon_i}{b_i \varepsilon_l}, \quad (6.11)$$

где Δl – выбранный шаг движения для фактора l ; Δi – шаг движения для i -го фактора; b_i, b_l – коэффициенты регрессии i -го и l -го факторов; $\varepsilon_i, \varepsilon_l$ – интервалы варьирования i -го и l -го факторов.

Движение по градиенту должно начинаться от нулевой точки (основного уровня каждого фактора), так как коэффициенты регрессии вычислены для функции отклика, разложенной в ряд Тейлора в окрестности нулевой точки. Если коэффициенты регрессии значительно отличаются друг от друга, то рекомендуют изменить интервалы варьирования факторов и провести новую серию экспериментов, ибо при различии коэффициентов на порядок и более многофакторный эксперимент при крутом восхождении может превратиться в однофакторный. Рассчитав шаг движения для каждого фактора, находят условия «мысленных» опытов. «Мысленными» называют эксперименты, условия проведения которых на стадии крутого восхождения установлены с учетом шага движения для каждого фактора. С целью проверки результатов крутого восхождения часть мысленных экспериментов реализуется.

Если при движении к оптимуму возникает ситуация, препятствующая изменению каких-либо факторов, то эти факторы можно фиксировать на оптимальных уровнях, продолжая движение по остальным факторам. Крутое восхождение прекращается, если найдены условия оптимизации или если ограничения на факторы подтверждают дальнейшее движение по градиенту неразумным.

Рассмотрим метод Бокса – Уилсона на примере исследования модифицирования чистого алюминия молибденом. В качестве параметра оптимизации y выбрали число зерен алюминия в 1 см^2 , определяющееся металлографическими исследованиями.

На параметр оптимизации оказывают существенное влияние следующие факторы: x_1 – количество введенного в алюминий молибдена, %; x_2 – температура перегрева, °C; x^3 – время нагрева, мин; x^4 – скорость охлаждения; x_1, x_2, x_3 – факторы количественные; x_4 – фактор качественный, принимающий два значения: быстрое охлаждение в графитовом тигле и медленное охлаждение в шамотном тигле. Выбранные интервалы варьирования и уровни факторов указаны в табл. 6.6.

Т а б л и ц а 6.6

Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование	Факторы			
	x_1	x_2	x_3	x_4
Основной уровень	0,40	840	60	–
Интервал варьирования	0,15	100	60	–
Верхний уровень (+)	0,55	940	120	Графитовый тигель
Нижний уровень (–)	0,25	740	0	Шамотный тигель

Была реализована полуреплика 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1 x_2 x_3 x_4$. Матрица планирования и результаты исследований представлены в табл. 6.7.

Матрица планирования

Номер эксперимента	Порядок реализации эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	4	+	+	+	+	+	100
2	3	+	–	+	+	–	81
3	8	+	+	–	+	–	95
4	5	+	–	–	+	+	36
5	7	+	+	+	–	–	130
6	2	+	–	+	–	+	69
7	1	+	+	–	–	+	90
8	6	+	–	–	–	–	64

Опыты не дублировали. Для определения дисперсии параметра оптимизации было проведено три эксперимента при нахождении факторов на основных уровнях (графитовый тигель). Полученные значения параметра оптимизации y_u , его среднее значение \bar{y} , отклонения значений параметра оптимизации от его среднего значения $(y_u - \bar{y})$ и квадраты этих отклонений приведены в табл. 6.8.

Вспомогательная таблица для расчета s_y^2

Номер эксперимента	y_u	\bar{y}	$(y_u - \bar{y})$	$(y_u - \bar{y})^2$
1	80	$\sum_{u=1}^3 y_u = 80$	0	0
2	82		2	4
3	78		–2	4
				$\sum_{u=1}^{n_0=3} (y_u - \bar{y})^2 = 8$

Дисперсия параметра оптимизации:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1} = 4.$$

Находим коэффициенты модели:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad b_1 = \frac{\sum_{j=1}^N x_{1j} y_j}{N};$$

$$b_0 = 83,1; b_1 = 20,0; b_2 = 11,9; b_3 = -5,1; b_4 = -9,4.$$

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии:

$$s\{b_i\} = +\sqrt{\frac{s_y^2}{N}} = 0,71.$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t_s \{b_i\}.$$

При 5 %-ном уровне значимости и числе степеней свободы $f = n_0 - 1 = 2$ табличное значение критерия $t_t = 4,3$. Следовательно, $\Delta b_i = \pm 3,053$.

Все коэффициенты регрессии по абсолютной величине больше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически значимыми. Таким образом, получили модель в виде полинома первой степени: $y = 83,1 + 20x_1 + 11,9x_2 - 5,1x_3 - 9,4x_4$.

Согласно полученной модели параметр оптимизации возрастает с увеличением значений факторов x_1, x_2 и уменьшением значений факторов x_3, x_4 . Наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывает фактор x_1 .

Проверку адекватности модели производим по F -критерию Фишера. Для вычисления дисперсии адекватности составим вспомогательную табл. 6.9.

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)} = 8;$$

$$F_p = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2} = 2,0.$$

Т а б л и ц а 6.9

Вспомогательная таблица для расчета $s_{\text{ад}}^2$

Номер опыта	y_j	\hat{y}_j	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	100	101	-1	1
2	81	79	+2	4
3	95	96	-1	1
4	36	37	-1	1
5	130	130	0	0
6	69	71	-2	4
7	90	87	+3	9
8	64	66	-2	4
				$\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 = 24$

Табличное значение F_T -критерия при 5 %-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 3 и для знаменателя 2 равно 19,2; $F_p < F_T$. Следовательно, модель адекватна. Полученное уравнение используем для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение (табл. 6.10) начинаем из нулевой точки (основные уровни): $x_1 = 0,40$; $x_2 = 840$; $x_3 = 60$; x_4 – медленное охлаждение (шамотный тигель), так как быстрое охлаждение приводит к уменьшению параметра оптимизации ($b_4 = -9,4$). Шаг движения для фактора x_2 принят $\Delta 2 = 100$ °С.

По формуле (6.11) вычисляем шаг движения для факторов x_1 и x_3 :

$$\Delta_1 = \Delta_2 \frac{b_1 \varepsilon_1}{b_2 \varepsilon_2} = 10 \frac{20 \cdot 0,15}{11,9 \cdot 100} = 0,0252;$$

$$\Delta_3 = \Delta_2 \frac{b_3 \varepsilon_3}{b_2 \varepsilon_2} = 10 \frac{(-5,1)60}{11,9 \cdot 100} = -2,57.$$

Т а б л и ц а 6.10

Параметры круглого восхождения по поверхности отклика

Наименование	x_1	x_2	x_3	x_4	y
Основной уровень	0,40	840	60	—	—
Коэффициент b_i	20	11,9	−5,1	−9,4	—
Интервал варьирования ε_i	0,15	100	60	—	—
$b_i x \varepsilon_i$	3	1190	−306	—	—
Шаг Δ_i	0,0252	10	−2,57	—	—
Округленный шаг	0,03	10	−3	—	—
Мысленный опыт	0,43	850	57	Шамотный тигель	—
То же	0,46	860	54	То же	—
Реализованный опыт 9	0,49	870	51	—«—	108
Мысленный опыт	0,52	880	48	—«—	—
То же	0,55	890	45	—«—	—
Реализованный опыт 10	0,58	900	42	—«—	196
Реализованный опыт 11	0,61	910	39	—«—	366
Реализованный опыт 12	0,64	920	36	—«—	313

Лучший результат получен в 11-м эксперименте. Величина параметра оптимизации удовлетворила исследователей, и работа была закончена. Таким образом, потребовалось 12 экспериментов для того, чтобы определить оптимальные условия модифицирования алюминия молибденом.

6.5. Проверка гипотезы нормальности распределения

Рассмотрим вариант проверки нормальности закона распределения генеральной совокупности, из которой взята выборка. Большая часть наших рассуждений о погрешностях основана на том, что погрешность распределена нормально: это допущение следует всегда проверять, если оно не вытекает из более ранних исследований.

Наиболее простой вариант, состоящий в сопоставлении измеренного распределения с нормальным, основан на исследовании так называемой диаграммы накопленной частоты (вероятности).

Количественная оценка проводится с помощью так называемого χ^2 (хи-квадрат)-распределения:

1. Определяют из выборки оценки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]}.$$

2. Разбивают измеренные значения на k ($k \geq 4$) интервалов (при необходимости интервалы могут иметь различную ширину) таким образом, чтобы в каждом интервале находилось, по крайней мере, пять измеренных значений.

3. Определяют число измеренных значений в каждом интервале n_{0i} .

4. Для нормального распределения с $\mu = \bar{x}$ и $\sigma = S$ находят вероятность P_i попаданий измеренных значений в i -тый интервал. По ней определяют число измеренных значений n_{0i} , которые должны были бы попасть в этот интервал при нормальном распределении: $n_{0i} = nP_i$, где n – объем выборки.

5. Проводят вычисления:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_{bi} - n_{0i})^2}{n_{0i}} \text{ и } n_f = k - 1 \text{ и, используя результаты, пред-}$$

ставленные на рис. 6.2, принимают или отвергают гипотезу.

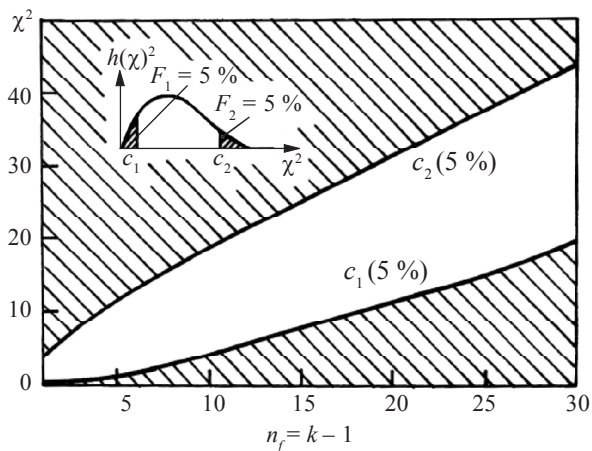


Рис. 6.2. Доверительные границы χ^2 -распределения, используемые для проверки гипотезы о нормальности распределения при уровне значимости 5 %:

$n_f = k - 1$ – число степеней свободы; k – число интервалов, используемых при проверке

Если точка (χ^2, n_f) лежит в незаштрихованной области, то нет оснований сомневаться в том, что генеральная совокупность, откуда произведена выборка, имеет предполагаемое нормальное распределение. Однако это не означает, что речь идет о каждом случае нормального распределения. Можно только утверждать, что если нормальное распределение действительно имеет место, то χ^2 в среднем только в 5 % всех случаев лежит в верхней и в 5 % всех случаев в нижней заштрихованных областях (рис. 6.2). Поэтому, если величина χ^2 попадает в эти области, гипотеза отвергается.

6.6. Различие средних значений

При расчете средних величин измерений двух выборок можно ожидать, что будут получены два разных значения даже тогда, когда обе выборки относятся к одной и той же генеральной совокупности.

Если, например, в течение каждого из двух произвольно выбранных дней проверять по одной выборке вес разлива дозирочной машины, то средние веса разлива двух дней будут отличаться друг от друга. Возможно, что это различие обусловлено только случайностью выборок. Однако не исключено, что усредненный вес разлива действительно изменяется. В первом случае обе выборки взяты из одной и той же генеральной совокупности, во втором случае – из двух различных генеральных совокупностей.

Если две средних величины измерений получены из одной и той же генеральной совокупности, то они представляют собой две оценки одного и того же математического ожидания. В этом случае величина t имеет t -распределение Стьюдента:

$$t = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \cdot \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}},$$

где n – объем выборок; \bar{x} – среднее значение выборки; S – рассеяние выборки (индекс соответствует номеру выборки).

Для t -распределения можно рассчитать вероятность того, что величина t выйдет за пределы $\pm c$ (рис. 6.3).

Проверку статистической достоверности различия средних величин измерений можно осуществить следующим образом.

1. Проводят вычисления:

$$t_0 = \left| \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \cdot \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \right|;$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}; \quad S_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2.$$

2. Приравнивая критерий значимости к величине t_0 (рис. 6.3), определяют соответствующую вероятность P (так называемый уровень значимости). При этом число степеней свободы

$$n_f = n_1 + n_2 - 2.$$

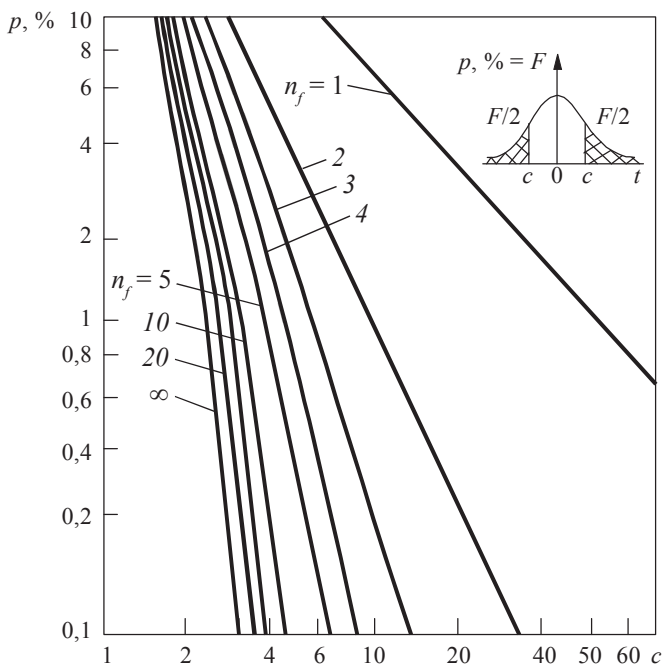


Рис. 6.3. Графическое t -распределение Стьюдента:

$P(\%)$ – вероятность того, что $|t| \geq c$; $P = f(c, n)$; n_f – число степеней свободы

3. Различие средних величин измерений является статистически достоверным, если уровень значимости достаточно мал (например, $P = 1\%$).

В этом случае можно считать, что имеется систематическое различие между средними величинами измерений.

Если проверка осуществляется для того, чтобы убедиться в случайности различий средних величин измерений, то уровень значимости должен быть по возможности наиболее высоким (например,

$P \geq 100 \%$). В неохваченной области вопрос остается открытым. Для его решения необходимо повторить проверку с привлечением выборки большего объема.

Если объем обеих выборок одинаков, т. е. $n_1 = n_2 = n$, то зависимости для t_0 и n_f упрощаются:

$$t_0 = \sqrt{n} \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}.$$

В этом случае степень свободы после операции 2 будет равна $n - 1$.

6.7. Линейная регрессия

В измерительной технике очень часто определяют зависимость одной переменной y от другой x . С помощью линейной регрессии исследуют линейную зависимость измеряемых величин. Рассмотрим величину y как зависимую, а величину x как независимую переменные. Так, например, при поверке величина, воспроизводимая мерой, является независимой, а показание поверяемого прибора – зависимой.

Наиболее предпочтительна линейная зависимость, но измеренные величины y , как правило, не лежат на прямой. В данном случае это происходит потому, что имеется случайная погрешность измерений. При исследовании статистических процессов это обусловлено и тем, что взаимосвязь является не функциональной, а лишь статистической. Так, например, рост сыновей зависит от роста родителей, но только в статистическом смысле.

Возникает вопрос, как провести искомую прямую, называемую прямой регрессии или прямой выравнивания, через точки измерения, нанесенные на $x - y$ -диаграмме, или как ее рассчитать.

Исходя из того, что для определенного значения независимой переменной x величина y нормального распределена относительно ее математического ожидания, лежащего на прямой, и что это нормальное распределение не зависит от переменной x , можно

применить метод наименьших квадратов. При этом рассматривают не расстояние точки измерения от прямой, а разность ординат точки измерения и прямой.

Прямую, соответствующую минимальной сумме квадратов погрешности, с наибольшей вероятностью можно рассматривать как искомую прямую генеральной совокупности и рассчитывать по следующей формуле:

$$(y - \bar{y}) = b(x - \bar{x}),$$

$$\text{где } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Крутизна прямой b называется коэффициентом регрессии и рассчитывается следующим образом:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}.$$

В результате получают оценку прямой, описывающей линейную зависимость. Здесь снова возникает проблема доверительных границ. Сначала мы рассмотрим доверительные границы для коэффициента регрессии b . Процедура решения этого вопроса состоит в следующем:

1. Выбирают доверительную вероятность P (%) (например, 95,99 % или другую).

2. По результатам исследований (см. рис. 6.3) (t -распределение Стьюдента) определяют $c = f(P, n_f)$, где $n_f = n - 2$ – число степеней свободы.

3. Вычисляют S_1^2 , S_2^2 и b :

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2; \quad S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2;$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

4. Определяют доверительные границы погрешности коэффициента регрессии:

$$E_{ap}, \% \pm c \cdot \frac{S_2^2 - b^2 S_1^2}{(n-2) S_1^2}.$$

Математическое ожидание β коэффициента регрессии b с доверительной вероятностью P (%) лежит в области

$$b - E_{ap}, \% \leq \beta \leq b + E_{ap}, \%.$$

Если доверительный интервал для коэффициента b включает величину $\beta = 0$, то с выбранной доверительной вероятностью нет оснований утверждать, что действительный коэффициент регрессии b отличен от нуля. В этом случае считают, что линейная зависимость не установлена с достаточной достоверностью.

Дополнительная недостоверность состоит в том, что средняя величина \bar{y} представляет собой лишь оценку соответствующего математического ожидания. Поэтому недостоверным является и «положение» прямой, построенной с учетом измерений \bar{y} .

Теперь можно для каждого значения y прямой линии $y - \bar{y} = b(x - \bar{x})$ определить доверительный интервал следующим образом:

1. Выбирают доверительную вероятность P (например, 95,99 % или другую).

2. По результатам, представленным на рис. 6.3 (t -распределение Стьюдента), определяют $c = f(p, n_f)$, где $n_f = n - 2$ — число степеней свободы.

3. Проводят вычисления:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]; \quad S_2^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right];$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

4. Определяют доверительный интервал погрешности измерений значений для разных значений y :

$$E_{aP}, \% = \pm c \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2 n(n-1)(S_2^2 - b^2 S_1^2) + (n-1)S_1^2}{n(n-1)(n-2)S_1^2}}. \quad (6.12)$$

Математическое ожидание μ_y величины $y = \bar{y} + b(x - \bar{x})$ с выбранной доверительной вероятностью P лежит в области

$$y - E_{aP}, \% \leq \mu_y \leq y + E_{aP}, \%$$

Как видно из (6.12), этот интервал зависит от x и минимален при $x = \bar{x}$, что связано с установленной выше недоустойчивостью коэффициента b .

Если требуется проверить только то, что крутизна b значимо отличается от нуля, т. е. что имеет место существенная и линейная зависимость между x и y , то поступают следующим образом.

Определяют:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2; \quad S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2;$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

$$\text{Вычисляют } c = \left| b \sqrt{\frac{(n-2)S_1^2}{(S_2^2 - b^2 S_1^2)}} \right|.$$

По результатам исследований (см. рис. 6.3) (t -распределение Стьюдента) определяют $P = f(c, n_f)$, $n_f = n - 2$.

Вероятность P (%) представляет уровень значимости отклонения крутизны b исследуемой зависимости от прямой с $b = 0$.

Если уровень значимости достаточно мал (например, $P \leq 1\%$), то гипотеза, что $\beta = 0$, исключается. В этом случае можно предполагать, что зависимость должна быть линейной.

6.8. Линейная корреляция

Если пары значений (x_i, y_i) изучают с целью выявления линейной зависимости и при этом x и y не рассматривают соответственно как зависимую и независимую переменные, то в этом случае говорят о корреляции. Например, рост пар сестер имеет статистическую зависимость. Однако было бы бессмысленным рост одной сестры рассматривать как свободную, а рост другой – как зависимую переменную. Такая же постановка вопроса имеет место, например, при сопоставлении давления воздуха, атмосферных осадков или температуры в различных местах.

Если пары значений (x_i, y_i) нанести на $x - y$ -диаграмму и искать прямую, которая изображает возможную линейную зависимость, то можно использовать метод наименьших квадратов. Имеют смысл две прямые, так как каждая переменная в равной мере может быть рассмотрена и как зависимая, и как независимая.

Если рассматривают функцию $y - \bar{y} = b(x - \bar{x})$, то коэффициент b_1 выбирают так, чтобы сумма всех квадратов $(y - y_i)^2$ была бы минимальной. Однако с теми же основаниями величина y может рассматриваться как свободная переменная. Тогда коэффициент b_2 функции $(x - \bar{x}) = b_2(y - \bar{y})$ выбирают так, чтобы минимальной была сумма всех квадратов $(x - \bar{x}) = b_2(x - \bar{x}_i)^2$. В общем случае обе прямые не совпадают.

Можно показать, что обе величины b_1 и b_2 тем сильнее стремятся к нулю и, следовательно, приближаются друг к другу, чем

более независимы друг от друга x и y . При полной статистической независимости прямые перпендикулярны и $b_1 = b_2 = 0$.

Если имеет место функциональная зависимость в математическом смысле, то $b_1 = 1/b_2$ и обе прямые регрессии совпадают.

Коэффициенты крутизны b_1 и b_2 в зависимости от степени (тесноты) статистической связи изменяются между нулем и значением крутизны, соответствующей линейной функциональной зависимости. Поэтому значения b_1 и b_2 в какой-то мере отражают тесноту линейной связи. Однако полностью охарактеризовать ее они не могут, так как не зафиксирована верхняя граница b . Этого можно достичь посредством нормирования. Нормированный следующим образом коэффициент r называется коэффициентом корреляции:

$$r = b_1 \frac{S_1}{S_2} = b_2 \frac{S_2}{S_1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}. \quad (6.13)$$

Коэффициент корреляции r может принимать значения только между -1 и $+1$. При строгой (функциональной) линейной связке x и y пары значений (x_i, y_i) лежат на прямой. При положительном коэффициенте угла наклона прямой имеем $r = +1$, а при отрицательном $r = -1$. Если x и y полностью статистически независимы, то $r = 0$.

Модуль коэффициента r является мерой линейной зависимости. Чем ближе пары значений расположены к прямой, тем в большей степени модуль r приближается к единице.

Здесь необходимо сделать три замечания, чтобы избежать ошибочной интерпретации:

1. Из сказанного вытекает, что если две величины не зависят друг от друга, то они не коррелированы и $r = 0$; если пары величин (x_i, y_i) лежат на прямой, то $r = 1$.

Однако обратные утверждения в общем случае не верны. Если $r = 0$, то это означает, что отсутствует линейная зависимость. Но это не означает, что x и y вообще не зависят друг от друга.

Если $r = 1$, то из этого не следует, что зависимость между x и y линейна, а только то, что эти величины зависят друг от друга.

2. Если r используется как мера линейной зависимости, то необходимо учитывать, что r зависит от объема выборки n . Очевидно, что при наличии только двух пар величин r всегда равен единице. Однако, как мы увидим при определении доверительных границ, при малых n доверительный интервал увеличивается и использование r в качестве статистической характеристики только при двух парах значений недопустимо.

3. Если пары значений лежат вблизи прямой, то из того, что r принимает значение, близкое ± 1 , не следует, что эта линейная зависимость отображает также причинно-следственную связь. Например, одновременно увеличиваются и средняя продолжительность жизни, и число жертв движения. Весьма вероятно, что имеется корреляция между числом совершаемых краж и числом автомобилей в определенном регионе, так как и то и другое увеличивается. Возможно, что такая мнимая, лишняя смысла корреляция происходит от того, что коррелированные явления имеют общую причину, однако так бывает не всегда. Гипотеза наличия причинно-следственной связи должна быть обоснована в каждом отдельном случае. Корреляция показывает лишь то, не противоречат ли полученные результаты этой гипотезе.

Коэффициент корреляции r , рассчитанный по уравнению (6.12), характеризует корреляцию в выборке. Он может быть использован в качестве оценки математического ожидания ρ коэффициента корреляции генеральной совокупности. При этом снова возникает задача статистической достоверности этого коэффициента.

Наиболее просто проверить гипотезу $\rho = 0$. При этом проверяют, является ли отличие коэффициента корреляции r от нуля статистически значимым. Однако эта проверка равнозначна проверке статистической значимости отличия от нуля коэффициентов b_1 прямой регрессии $y - \bar{y} = b_1(x - \bar{x})$. Поэтому она может быть осуществлена в соответствии с процедурой, изложенной выше.

Доверительный интервал для коэффициента корреляции определяют следующим образом:

1. Выбирают доверительную вероятность P (например, 95,99 % и т. п.).

2. По результатам, представленным на рис. 6.3 рассчитанной статистической надежности, определяют величину $c/\sigma = f(P)$, вычисляют $\sigma = 1/\sqrt{n-3}$ и определяют c .

3. Определяют коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}.$$

4. По результатам исследований (рис. 6.4) определяют зависимость $y = \arcsin thr$.

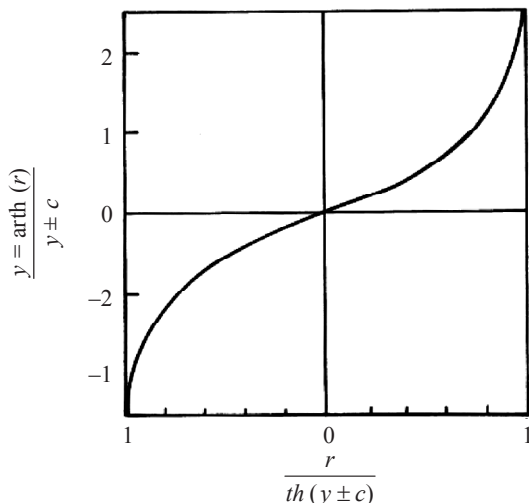


Рис. 6.4. Графическая зависимость взаимосвязи r и $\arcsin thr$

5. Еще раз, используя результаты, представленные на графике (см. рис. 6.4), определяют величины:

$$r_1 = th(y - c); \quad r_2 = th(y + c).$$

6. Доверительный интервал для ρ будет равен: $r_1 \leq \rho \leq r_2$.

6.9. Автоматическая коррекция погрешности

Обычно стремятся так спроектировать измерительное устройство, чтобы избежать громоздких вычислений, производимых для определения средней величины измерений с целью уменьшения случайной погрешности. Это можно осуществить посредством экранирования помех, компенсации погрешности, введения обратной связи. Прежде всего, необходимо выяснить, являются ли помехи аддитивными или мультипликативными, а также возможность воздействия на помехи до входа их в измерительную систему.

1. Принцип экранирования помех. Хотя основная область использования этого принципа связана с динамическими измерениями, с компенсацией помех, изменяющихся во времени, он используется также и при статических или квазистатических измерениях.

Если на помехи, аддитивные или мультипликативные, можно воздействовать до входа их в измерительную систему, то следует устранить их влияние посредством экранирования. Например, влияние температуры на прецизионные весы устраняется термостатированием. Другой способ уменьшения влияния температуры окружающей среды состоит в нагреве чувствительных элементов до такой высокой температуры, что колебания температуры окружающей среды не оказывают заметного влияния на точность измерения.

В качестве других примеров применения принципа экранирования помех можно назвать осушку или насыщение влагой пробы газа при измерении концентрации его составляющих элементов.

Преимущество экранирования помех по сравнению с рассматриваемой их компенсацией состоит в том, что оно позволяет успешно бороться и с мультипликативными помехами.

2. Принцип компенсации погрешности. Принцип компенсации погрешности основан на том, что возмущающее воздействие помех на измерительное устройство остается, но его эффект вычисляется и возникающая погрешность компенсируется. Компенсация аддитивных помех существенно проще, так как ее воздействие складывается с измерительным сигналом, и коррекция сводится к вычитанию этого воздействия. Для компенсации мультипликативной помехи необходима дополнительная обработка измерительного сигнала и сигнала помех.

Наиболее известным примером применения этого принципа в случае аддитивной помехи является компенсация температуры при измерении деформации с помощью тензометров. Температурное изменение сопротивления рабочего тензорезистора компенсируется точно таким же изменением сопротивления пассивного компенсационного тензорезистора. Возможны также схемы с несколькими активными тензорезисторами.

Примером компенсации мультипликативных помех может служить компенсация влияния изменения температуры и давления газа на измерение его расхода с помощью измерительной диафрагмы. В этом случае компенсация влияния изменения температуры и давления осуществляется при помощи вычисления.

3. Принцип обратной связи. Этот принцип применим для устранения влияния как аддитивных, так и мультипликативных помех. Его преимущество состоит в том, что он может быть использован тогда, когда помехи не могут быть определены.

Этот принцип основан на том, что выходная величина определяется и сравнивается с сигналом чувствительного элемента. Если возникает расхождение этих величин, то выходная величина изменяется усилителем или интегрирующим устройством до получения соответствия между выходной и входной величинами.

Качество соотнесения входа к выходу существенно зависит от качества сравнения этих величин. Поэтому приборному узлу, выполняющему эту операцию, следует уделить особое внимание. Нелинейность измерительного прибора и влияние помех, действующих на прибор, в значительной степени снижаются. Измери-

тельное устройство с обратной связью представляет собой систему регулирования; оно должно быть тщательно проанализировано с точки зрения динамики, в частности, устойчивости.

Принцип обратной связи находит применение в измерительной технике прежде всего там, где требуется сравнительно большая выходная мощность и имеются внутриприборные помехи. Применение этого принципа является единственной возможностью борьбы с такими внутренними помехами, как трение, люфт и т. д.

Типичным примером применения этого принципа является автоматический самопишущий потенциометр. Входное напряжение сравнивается с напряжением, снимаемым с ползуна потенциометра, которое пропорционально выходной величине x_a . При наличии разности напряжений усилитель управляет двигателем, который перемещает каретку с указателем, пером и ползунком потенциометра до тех пор, пока не наступит равенство указанных напряжений. При этом влияние трения, люфта, дрейфа усилителя и т. п. исключается или уменьшается. Линейность прибора в основном определяется линейностью собственно потенциометра.

7. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В современных прикладных исследованиях, особенно в сфере технических наук, находят применение самые разнообразные математические приемы. «Математический инструментарий» исследователя в сфере прикладных наук обычно уже, чем в фундаментальных, однако это нельзя считать общим правилом, так как методы исследований в значительной мере зависят от личных предпочтений и математической культуры конкретного исследователя. Удачная математическая модель зачастую позволяет совершенно по-новому посмотреть на изучаемый объект и получать самые неожиданные результаты. Более того, имеется немало примеров, когда внедрение некоторых математических понятий в ту или иную отрасль науки влияло на все ее дальнейшее развитие. Таковым, например, было использование понятия вектора в механике, понятие функции в физике и многих связанных с ней науках. Немало других, более узких математических понятий стало неотъемлемой частью многих технических наук, которые в настоящее время уже трудно представить без этих понятий. Например, современные гидравлика, теплотехника и ряд других технических наук неразрывно связаны с понятием «критерия подобия». В гидравлике это критерии Рейнольдса, Фруда, Пуазейля и др., в теплотехнике – критерии (числа) Фурье, Био, Прандтля и т. д. Хотя эти понятия пришли из математики, вносили их в технические науки, как правило, не математики, а специалисты по соответствующим отраслям физических знаний (инженеры-физики О. Рейнольдс, У. Фруд, механик Л. Прандтль и т. д.).

Математизация всегда вносит порядок в рассмотрение любого, даже незначительного научного вопроса. Специалист в области той или иной прикладной науки нередко своим исследованием

дополняет «математический инструментарий» этой науки, хотя чаще всего вносимые дополнения оказываются не столь эффективными, чтобы превращаться в общепринятые методы.

Несмотря на отсутствие единых правил математической трактовки физических процессов, обобщение опыта таких трактовок имеет очень большое значение, так как оно позволяет выделять многие типовые приемы решения возникающих задач. Изучение их является исключительно полезным для начинающего исследователя, подобно тому как для начинающего шахматиста полезно изучение множества ранее известных дебютов, типичных комбинаций, окончаний и т. д. Далее приводятся некоторые приемы математической интерпретации инженерных задач, характерные для технических наук [1].

7.1. Дифференциальные уравнения

Дифференциальные уравнения представляют один из наиболее старых «инструментов» исследователя, который в настоящее время существенно трансформировался применительно к современным условиям научной деятельности (компьютеризации и пр.). Тем не менее происшедшие изменения в основном коснулись методов решения таких уравнений (или их систем), главная же проблема исследователя – составление этих уравнений – осталась неизменной, т. е. такой же, как и в «докомпьютерную эпоху».

Единой методики составления дифференциальных уравнений, которую мог бы освоить начинающий исследователь за короткое время, не существует; необходима длительная практическая тренировка в решении подобных задач. Однако сложность использования дифференциальных уравнений в качестве математических моделей начинающий исследователь часто сильно преувеличивает. Решение многих технических задач не требует принципиально нового подхода и зачастую может сводиться к корректировке уже полученных ранее решений. Как правило, среди множества публикаций по изучаемому вопросу имеются работы, в которых авторы

уже решали аналогичные теоретические задачи, используя дифференциальные уравнения в качестве математической модели. В этих работах могли рассматриваться несколько иные условия, авторы могли в чем-то ошибаться, что-то недооценивать или переоценивать, так что корректировка их решений может быть очень полезным шагом в изучении рассматриваемого вопроса. Тем не менее внесение поправок в такие решения несопоставимо проще, чем создание принципиально новой математической модели, т. е. такое усовершенствование известных решений вполне может быть доступно начинающему исследователю, даже не обладающему большими навыками составления дифференциальных уравнений. Это характерно для многих исследований в сфере механики (теории упругости, теории пластичности, статики и динамики машин и т. д.), когда сложные на первый взгляд решения нередко оказываются вариантами преобразования уже известных решений.

Очевидно, что описанная ситуация не всегда имеет место. В ряде случаев решение-аналог найти не удастся, и исследователь вынужден в какой-то мере становиться первопроходцем, создавая свою математическую модель. Тем не менее и в этих случаях работа упрощается, если исследователь знаком с некоторыми типовыми приемами составления дифференциальных уравнений. Хотя такие приемы, неоднократно предлагавшиеся различными авторами, не свободны от субъективизма, начинающий исследователь всегда может найти в них много полезных «подсказок» для своих исследований.

На первом этапе составления дифференциальных уравнений полезно составить упрощенную схему взаимодействия объекта с внешней средой. На рис. 7.1 представлены наиболее простые схемы таких взаимодействий [2].

Схема, представленная на рис. 7.1, *а*, отражает ситуацию, когда на объект воздействует только один фактор x , а его поведение (взаимодействие с внешней средой) оценивается по одному показателю y (один выходной сигнал).

Схема, соответствующая рис. 7.1, *б*, отражает ситуацию, когда на объект действует тоже один фактор x , но его поведение оценива-

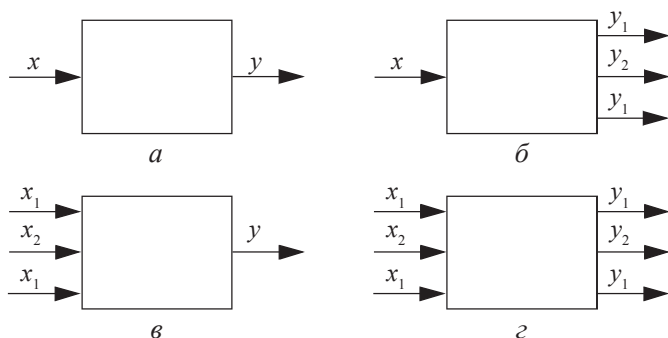


Рис. 7.1. Схемы взаимодействия объекта с внешней средой
(пояснения в тексте)

ется по нескольким показателям y_1, y_2, \dots, y_i (несколько выходных сигналов).

Схема, соответствующая рис. 7.1, в, – на объект действуют несколько факторов x_1, x_2, \dots, x_i , но его поведение оценивается по одному показателю y .

Схема, соответствующая рис. 7.1, г, – на объект действуют несколько факторов x_1, x_2, \dots, x_i , и его поведение оценивается тоже по нескольким показателям y_2, \dots, y_i .

Изменение выходного сигнала во времени $y(t)$ называют выходной характеристикой системы.

Схемы с несколькими входными воздействиями x_1 и выходными сигналами y_1 обычно приводятся к более простым схемам с единичными воздействиями и выходными сигналами. Каждое воздействие связывается с каждым выходным сигналом, при этом выходные сигналы считаются независимыми.

В задачах, связанных с применением методов механики, параметрами изменений воздействующих факторов и выходных сигналов чаще всего являются время (t) и пространственные координаты (x, y, z). В случаях, когда изучаемый объект является статическим, т. е. его выходные сигналы не зависят ни от времени, ни от пространственных координат, построение функциональной модели обычно осуществляется с помощью алгебраических уравнений.

Если интересующие исследователя переменные зависят от времени, но не зависят от пространственных координат, для моделирования используются обыкновенные дифференциальные уравнения.

В случаях, когда выходная характеристика зависит и от времени, и от пространственных координат, используются дифференциальные уравнения с частными производными.

Структуру дифференциального уравнения можно приближенно определять по виду выходной характеристики изучаемого объекта, получаемой на основе экспериментов или даже исходя из сложившихся практических представлений. На рис. 7.2 [15] представлены примеры графических зависимостей y от параметра t (характеристик объекта изучения), каждая из которых соответствует решению различных дифференциальных уравнений.

Так, линейная зависимость на рис. 7.2, *a* (наклонная часть) соответствует решению дифференциального уравнения

$$\frac{dy}{dt} = kx \quad (7.1)$$

при начальном условии $t = 0 \rightarrow y = 0$.

В этом уравнении k – коэффициент размерности и пропорциональности ($k > 0$).

Зависимость на рис. 7.2, *б* соответствует решению такого же уравнения, но при начальном условии $t = 0 \rightarrow y = y_0 \neq 0$.

Более сложный вид реакции объекта на ступенчатое входное воздействие, представленный на рис. 7.2, *з*, может быть описан полным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dy}{dt} + a_0 y = kx, \quad (7.2)$$

где a_0 , k – коэффициенты дифференциального уравнения. Начальное условие: $t = 0 \rightarrow y = y_0 \neq 0$.

Реакция объекта, соответствующая рис. 7.1, в, позволяет использовать в качестве математической модели дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = kx, \quad (7.3)$$

где a_0, a_1, k – коэффициенты уравнения.

Начальное условие: $t = 0 \rightarrow y = y_0 \neq 0$.

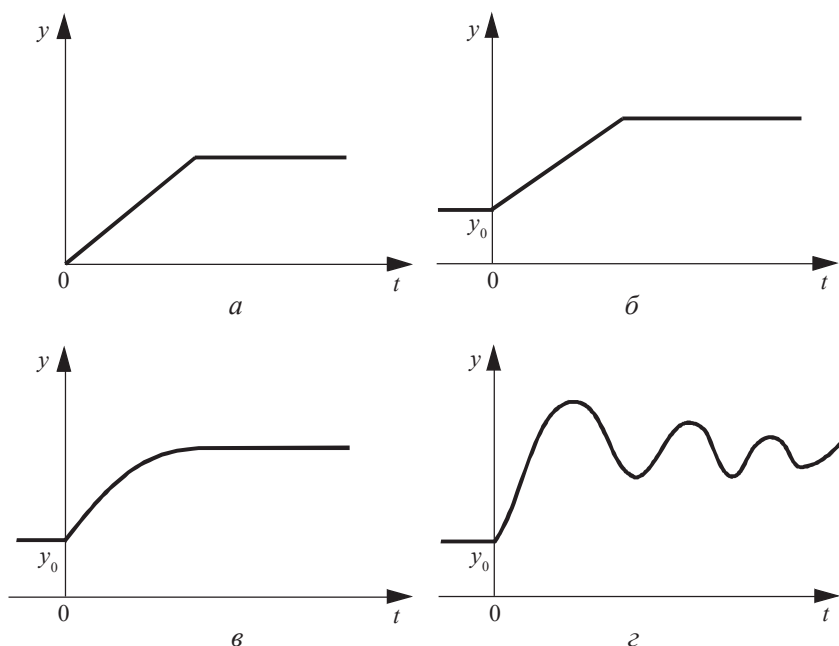


Рис. 7.2. Примеры характеристик изучаемого объекта при ступенчатом внешнем воздействии (зависимости искомого показателя y от параметра t) (пояснения в тексте)

Если входные воздействия x являются некоторыми функциями от параметра t (времени или другого фактора), в приведенных дифференциальных уравнениях изменяются правые части, т. е. принимается $y = f(t)$.

Естественно, что описанный прием удастся использовать далеко не всегда, ибо исследователь может не располагать необходимой для этого информацией. Чаще всего приходится искать математическую модель, не зная ее структуры, исходя из логического анализа имеющихся представлений об изучаемом процессе. Такой поиск обычно основывается либо на анализе малых приращений изучаемых переменных, рассматриваемых как дифференциалы, либо на анализе скоростей их изменения, рассматриваемых как производные. Вместо скоростей иногда удобно рассматривать ускорения, представляющие вторые производные рассматриваемой переменной. Принципиальной разницы в таких подходах нет, их применение – вопрос удобства и простоты рассуждений.

Далее приводятся некоторые примеры, иллюстрирующие эти подходы (из статьи «Дифференциальные уравнения», БСЭ, т. 8).

Пример 1. Если тело, нагретое до температуры T , помещено в среду, температура которой равна нулю, то при известных условиях можно считать, что приращение ΔT (отрицательное при $T > 0$) его температуры за малый промежуток времени Δt с достаточной точностью выражается формулой

$$\Delta T = -kT\Delta t,$$

где k – постоянный коэффициент.

Заменяя приращения ΔT , Δt дифференциалами, имеем:

$$dT = -kTdt,$$

т. е. получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dT}{dt} = -kT. \quad (7.4)$$

Общее решение (общий интеграл) этого уравнения имеет вид:

$$T = Ce^{-kt}, \quad (7.5)$$

где постоянная C определяется, исходя из начального условия

$$t = 0 \rightarrow T_0 = Ce^0 = C,$$

где T_0 – температура в момент времени $t = 0$.

Таким образом, частное решение будет иметь вид:

$$T = T_0 e^{-kt}. \quad (7.5a)$$

Эту же задачу можно решать, исходя из условия, что скорость остывания убывает пропорционально температуре, т. е. принимая зависимость (7.4) за исходную. Все последующие действия остаются прежними.

Пример 2. Груз массой m подвешен к пружине и находится в положении равновесия (рис. 7.3, *a*). Отклонения его от положения равновесия с помощью растяжения пружины (рис. 7.3, *б*) приводят груз в движение. Если $x(t)$ обозначает величину отклонения груза от положения равновесия в момент времени t , то ускорение тела выражается второй производной $\ddot{x}(t)$. Сила $m \cdot \ddot{x}(t)$, действующая на тело, при небольших растяжениях пружины по законам теории упругости пропорциональна отклонению $x(t)$. Таким образом, получается дифференциальное уравнение

$$m \cdot \ddot{x}(t) = -kx(t), \quad (7.6)$$

или, в другой форме записи:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx. \quad (7.6a)$$

Его решение имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx = A \sin \left(t \sqrt{\frac{k}{m}} + x_0 \right) \quad (7.7)$$

и показывает, что тело будет совершать гармонические колебания (рис. 7.3, *в*).

В выражениях (7.6)–(7.7) используются наиболее привычные обозначения пути и ускорения x и \ddot{x} , если же привести их в соответствие со схемами рис. 7.1, то x везде необходимо заменить на y .

Аналогичным образом составляются и уравнения в частных производных. Как правило, это является более сложным вопросом, особенно на этапе решения этих уравнений, ибо интегрирование

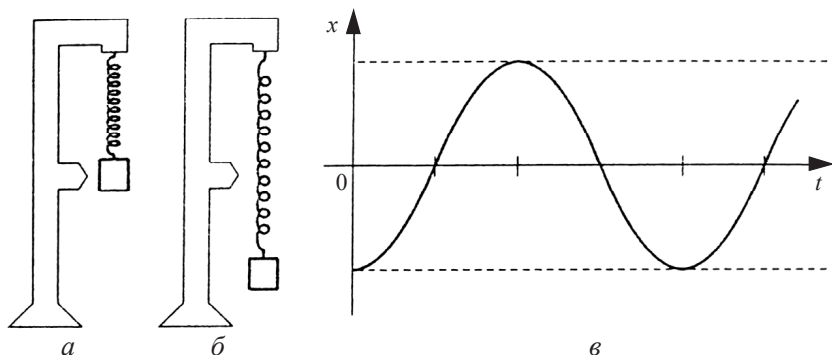


Рис. 7.3. Схема к примеру 2:

a – состояние равновесия груза ($x=0$); b – максимальное отклонение груза от положения равновесия ($x=x_{\min}$); v – график $x(t)$, отображающий изменение положения груза во времени

дифференциальных уравнений в частных производных применительно к тем или иным краевым условиям представляет во многих случаях сложнейшую математическую задачу. При решении конкретных практических вопросов чаще всего исследователи ограничиваются совершенствованием ранее известных решений, а в последние годы явно преобладают численные методы решения.

7.2. Основные численные методы решения технических задач

Методология численных решений дифференциальных уравнений уже давно стала одной из важных областей прикладной математики. Разработаны специальные методы таких решений, среди которых особого внимания заслуживают метод конечных разностей, метод граничных элементов и, особенно, метод конечных элементов. Эти методы нашли исключительно широкое применение в различных областях механики: статике сооружений, механике сплошных сред (теории упругости, теории пластичности и др.), механике грунтов и т. д. В этих методах вместо решения (интегрирования)

дифференциальных уравнений составляются (по определенным правилам) и решаются соответствующие этим дифференциальным уравнениям системы алгебраических уравнений. Количество неизвестных (и соответственно алгебраических уравнений) определяется числом рассматриваемых узлов принятой расчетной схемы и чаще всего исчисляется сотнями или даже тысячами, поэтому расчеты выполняются на компьютерах с помощью специальных программ.

Упомянутые методы подробно описаны в специальной литературе, далее кратко приводятся лишь их основные идеи.

Метод конечных разностей (МКР) исторически предшествовал развитию других численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных. Идея метода в том, что частные производные в дифференциальных уравнениях заменяются отношениями разностей переменных (конечными разностями), в результате чего получаются разностные уравнения (уравнения в конечных разностях). Рассматриваемый объект разделяется на дискретные интервалы, т. е. фиксируется некоторая система узловых точек, соответствующих границам таких интервалов (местам контактов смежных участков).

В случае одномерной задачи, т. е. когда изучается функция $u = f(x)$, исследуемая область аргумента разделяется на конечное число участков Δx (рис. 7.4, а). При числе участков n число узлов составит $n + 1$. При решении двумерных задач $u = f(x, y)$ в пределах исследуемой области строится сетка с шагами по соответствующим координатам Δx , Δy , причем узлами считаются точки пересечения линий сетки (рис. 7.4, б). При числе участков Δx и Δy соответственно n и m число узлов составляет $(n + 1)(m + 1)$.

При многомерной задаче используется пространственная (многомерная сетка).

Для каждого i -го узла дифференциальное уравнение преобразуется в конечно-разностный аналог, т. е. дифференциальные операторы заменяются разностями, охватывающими обычно два интервала – вправо и влево от узла: например, по оси x это будут интервалы $x + \Delta x$ и $x - \Delta x$.

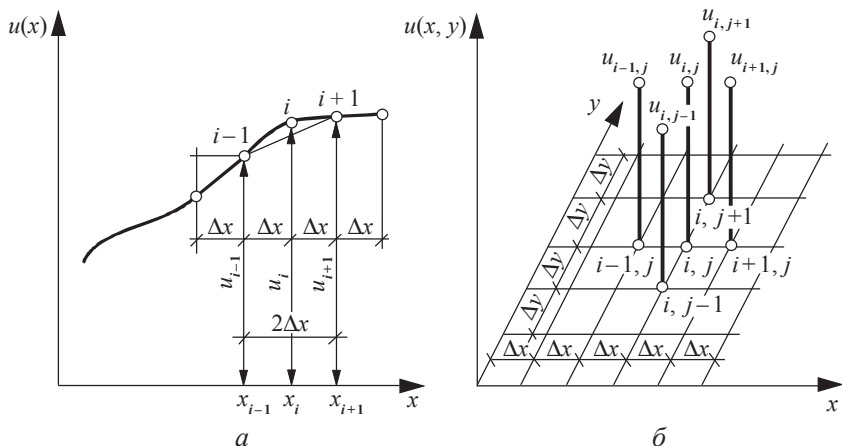


Рис. 7.4. Схемы к построению конечно-разностных соотношений:

a – одномерная задача; b – двумерная задача

При одномерной задаче первая производная заменяется конечно-разностными соотношениями:

$$\frac{du}{dx} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x}. \quad (7.8)$$

Если задача является двумерной, т. е. изучается функция $u = f(x, y)$, то на каждом (i, j) -м участке производится замена:

$$\frac{du}{dx} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x}; \quad (7.9)$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_{i,i+1} - u_{i,i-1}}{y_{i+1} - y_{i-1}} = \frac{u_{i,i+1} - u_{i,i-1}}{2\Delta y}. \quad (7.9a)$$

На основе несложных операций, связанных с использованием теоремы Тейлора, получены формулы для перехода от дифференциальных операторов к конечно-разностным применительно к первой, второй, третьей и т. д. производным.

Таким образом, производные в исходных дифференциальных выражениях заменяются конечными разностями, в результате чего получаются разностные уравнения, в которых неизвестными являются значения искомых функций в некотором числе узлов (обычно это большинство узлов). Для каждого узла записывается столько разностных уравнений, сколько значений искомых функций должно быть определено в этом узле. Общее же число таких уравнений будет равно произведению числа искомых функций на число узлов. Граничные условия также записываются в разностной форме. В сочетании с ними полученные разностные уравнения образуют систему алгебраических уравнений, решение которой и дает значения искомых функций во всех узлах.

Идея метода граничных элементов (МГЭ) состоит в том, что определение искомых функций внутри некоторой области R сводится к определению этих функций на границе этой области, после чего получают решения в любой точке изучаемой области R по аналитическим формулам, не прибегая к дискретизации этой области. Наиболее типичная область применения метода – определение напряженно-деформированного состояния упругих (линейно деформируемых), упругопластичных сред, стержневых систем и прочие задачи механики подобного типа.

В методе граничных элементов большое значение имеют так называемые сингулярные решения, т. е. аналитические решения, отвечающие точному возмущению в бесконечной однородной среде. Эти решения не проявляют каких-либо аномалий в области R , за исключением самой точки возмущения, где проявляется математическая аномалия – сингулярность. Примером сингулярности может служить значение напряжений в точке действия силы на поверхности упругого полупространства в известном решении Буссинеска. Напряжения (и соответственно деформации) в этой точке оказываются по Буссинеску бесконечными.

Для пояснения сущности МГЭ целесообразно рассмотреть более конкретную задачу [20].

Пусть необходимо получить значения искомой функции в пределах области R , ограниченной контуром C (рис. 7.5). Вместо непо-

средственного решения задачи для ограниченной области R рассматривается задача о бесконечной плоскости, на которой эта область располагается. На рис. 7.5, $б$ пунктирная линия C' отмечает след контура C на этой плоскости.

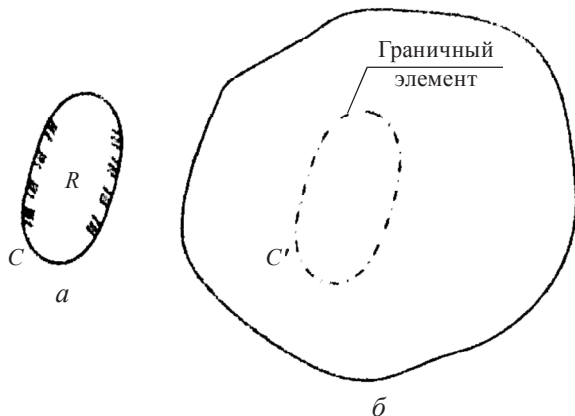


Рис. 7.5. Схема, поясняющая пример применения МГЭ:
 $а$ – изучаемая область R , ограниченная контуром C ; $б$ – вспомогательный контур C'

Предположим, что имеется сингулярное решение для точечного возмущения (например, сосредоточенной силы) в некоторой точке бесконечной плоскости. Разделим C' на ряд элементов (граничных элементов), как это показано на рис. 7.5, и примем допущение, что нас удовлетворит приближенное решение, которое будет отвечать условиям на C только в средних точках элементов на C' . Разместим сингулярности на C' – по одной в центре каждого из N граничных элементов. Тогда при условии линейности исходных дифференциальных уравнений для сингулярного решения воздействие всех сингулярностей на произвольный граничный элемент можно рассматривать как сумму воздействий отдельных сингулярностей неизвестной интенсивности. Однако, хотя значения интенсивностей отдельных сингулярностей неизвестны, из граничных условий на C известно совместное их действие. В связи с этим можно записать систему N линейных алгебраических уравнений относи-

тельно N неизвестных значений интенсивности. Решение такой системы и будет главным этапом численного решения исходной задачи, т. е. оно будет отражать значения искомой функции в каждом граничном элементе на контуре C' . После получения таких значений для граничных элементов можно построить решение в любой точке области R по аналитическим формулам, не прибегая к дискретизации этой области, т. е. не разделяя ее на мелкие дискретные элементы.

Таким образом, в МГЭ на простые элементы разделяется не вся изучаемая область, а лишь ее границы.

Для решения сложных задач обычно используются более гибкие варианты МГЭ, приспособленные для широкого круга условий. Эти варианты достаточно подробно описаны в специальной литературе. Они содержат довольно громоздкие математические выкладки, и от рассмотрения их при первом знакомстве с МГЭ можно воздержаться.

Метод конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время одним из наиболее популярных численных методов решения прикладных задач. Он получил особенно широкое применение в механике. Подавляющее большинство современных программных комплексов, применяемых при решении задач в упомянутых выше областях, основываются на использовании МКЭ. За последние два-три десятилетия в сфере механики МКЭ практически вытеснил рассмотренные выше методы МКР и МГЭ. Подробное изложение этого метода приводится в современных учебниках по механике, теории упругости, теории пластичности и др. Далее кратко излагаются основные принципы МКЭ в том виде, в каком они обычно используются в упомянутых областях механики.

Идея метода конечных элементов состоит в мысленном разделении изучаемой области на простейшие (конечные) элементы, соединяющиеся в узлах, и изучении поведения полученной (дискретизированной) системы при воздействии на нее внешних факторов. Как и в рассмотренных выше методах (МКР, МГЭ), задача сводится к решению системы алгебраических уравнений, число которых определяется числом упомянутых узлов и числом величин, опреде-

ляемых в этих узлах. Если искомая величина является скалярной (температура и др.), количество уравнений будет равно числу узлов N . Если искомая величина – вектор (перемещения, силы и др.), число уравнений будет равно $2N$ или $3N$ в зависимости от числа составляющих такого вектора (плоская или пространственная задача) и т. д.

Как и в МКР и МГЭ, в МКЭ точность расчета зависит от степени дискретизации изучаемой системы: она будет тем выше, чем на большее число элементов разделяется изучаемая область (т. е. чем больше узлов имеет дискретизированная система). Это связано с тем, что условия совместимости деформаций выполняются только в узлах дискретизированной системы. В зависимости от размерности изучаемого объекта (точнее, его математической модели), конечные элементы могут быть одномерными (отрезками линий), двумерными (плоскими) или трехмерными (объемными). В общем случае они могут иметь любую форму (прямолинейную или криволинейную), но в подавляющем большинстве случаев удобно ограничиваться простейшими формами – треугольной или прямоугольной.

При решении задач в области механики конечные элементы размещаются таким образом, чтобы нагрузки попадали на какие-либо узлы полученной дискретной системы. Сами же узлы обычно располагают в вершинах конечных элементов, хотя в некоторых случаях их размещают на сторонах или даже внутри таких элементов. На рис. 7.6 приведен пример деления объекта на треугольные конечные элементы. Принятие одинаковых размеров конечных элементов, как это сделано на рис. 7.6, не является обязательным требованием: на участках с наиболее интенсивным изменением искомого показателя конечно-элементная сетка обычно сгущается.

МКЭ позволяет обходиться без составления дифференциальных уравнений, требуется лишь разбиение рассматриваемого объекта на конечные элементы и задание внешних нагрузок, действующих на узлы конечно-элементной системы.

Соединения в узлах могут быть жесткими и шарнирными. В зависимости от этого состояние каждого элемента характеризуется

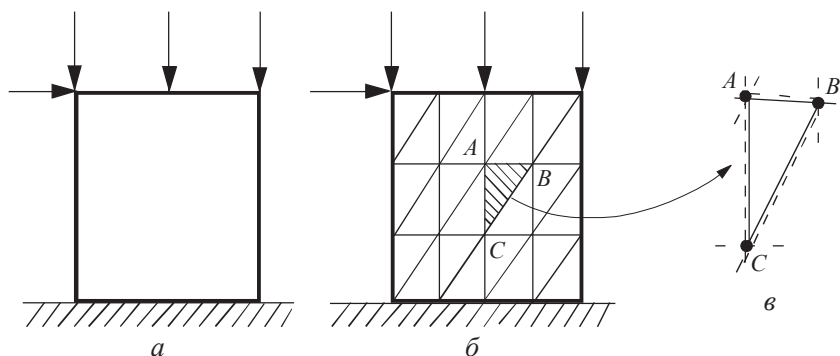


Рис. 7.6. Схема замены изучаемого объекта системой из конечных элементов:

a – изучаемый объект (континуальная система); *б* – разделение изучаемого объекта на конечные элементы треугольной формы; *в* – схема соединения конечного элемента *ABC* с соседними элементами (обозначенными пунктиром) в точках *A*, *B*, *C*

тем или иным числом возможных перемещений его узлов, называемым «числом степеней свободы». Если плоский узел представляет собой шарнир, то его положение на плоскости можно охарактеризовать двумя линейными перемещениями, например, вертикальным и горизонтальным. Если же это жесткий узел, необходимо добавить третью степень свободы – поворот.

В задачах, связанных с изучением напряженно-деформированного состояния сплошных сред или стержневых систем, полученная совокупность конечных элементов рассматривается как статически неопределимая система, в узлах которой требуется определить перемещения и усилия. Для таких определений наиболее удобным оказывается метод перемещений, сущность которого состоит в мысленном введении в систему дополнительных связей (защемлений) и выявлении условий, когда в этих связях не возникают усилия (моменты, силы).

Составляется система канонических уравнений, отображающая факт отсутствия таких усилий при повороте добавленных защемлений на угол, соответствующий фактическому повороту узлов

$$\left[r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + \dots + r_{1n}Z_n = F_{1p}; \right.$$

$$r_{n1}Z_1 + r_{n2}Z_2 + \dots + r_{nn}Z_n = F_{nP_q}.$$

В матричной форме система канонических уравнений (7.10) может быть представлена в виде

ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ (МОМЕНТОВ), СООТВЕТСТВУЮ-

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \end{pmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

$$(Z, \cdot)$$

$$(Z) \quad \begin{array}{|c} Z_1 \\ Z_2 \end{array} \quad (7.12)$$

$\{F\}$ – вектор (матрица-столбец) компонентов реактивных моментов (усилий) от действия внешних нагрузок (в системе уравнений (7.10), соответствующих величинам F_{iP_q}):

$$\{F\} = \begin{pmatrix} F_{1P_q} \\ F_{2P_q} \\ \dots \\ F_{nP_q} \end{pmatrix}. \quad (7.14)$$

Искомые перемещения Z_i определяются, исходя из преобразования матричного уравнения (7.11):

$$\{Z\} = [R]^{-1} \cdot \{F\}, \quad (7.15)$$

где $[R]^{-1}$ – обратная матрица по отношению к матрице жесткости (7.12), остальные обозначения те же, что и в (7.11).

По вычисленным перемещениям Z_i в каждом узле определяются нормальные и касательные напряжения [18].

В данном случае принцип получения матрицы жесткости приведен в упрощенной форме для иллюстрации основной идеи метода перемещений. Фактически в МКЭ процедура составления матрицы жесткости несколько сложнее и обычно предполагает два этапа [20, 21]:

- 1) составление матрицы жесткости конечного элемента – МЖЭ;
- 2) составление матрицы жесткости системы – МЖС (глобальной матрицы жесткости).

МЖС получается на основе построения МЖЭ каждого элемента. Элементы МЖЭ r_{ij} отражают усилия, действующие на i -й узел элемента при единичном смещении (угловом или линейном) j -го узла по направлению какой-либо из его степеней свободы. При этом предполагается, что перемещения по направлению остальных степеней свободы равны нулю. МЖЭ однозначно определяется конфигурацией конечного элемента, задаваемой координатами его узлов и характеристиками деформационных свойств его материала.

Поскольку в каждом узле обычно соединяются несколько конечных элементов, реакции отдельных элементов по каждому направлению суммируются.

Компоненты МЖС вычисляются путем суммирования компонентов МЖЭ следующим образом:

$$r_{ij} = \sum_{r \in i, j} r_{ij, r}, \quad (7.16)$$

где запись $r \in i, j$ означает, что суммирование производится по элементам, содержащим узлы i и j ; если это не соблюдается, то $r_{ij, r} = 0$; r_{ij} – компонент МЖС – суммарное реактивное усилие (момент) в i -м узле от единичных перемещений (угловых, линейных) j -х узлов, принадлежащих соседним конечным элементам, содержащим узел i ; $r_{ij, r}$ – компонент МЖЭ – реактивный момент (усилие) в i -м узле конечного элемента r от единичного перемещения (углового, линейного) j -го узла того же конечного элемента.

Аналогичным образом вычисляются компоненты вектора $\{F\}$, отражающего реактивные усилия от действия внешних нагрузок P_q (см. матричную зависимость (7.11)).

Полученная матрица жесткости системы $[R]$, компоненты которой определяются по формуле (7.16), используется для определения неизвестных Z_i так же, как и в рассмотренном выше случае, т. е. на основе матричной зависимости (7.15). В ней под $[R]$ и $\{F\}$ понимаются соответственно матрица жесткости системы (МЖС) и вектор реактивных усилий от действия внешних нагрузок.

В настоящее время в инженерной практике все расчеты, связанные с применением МКЭ, выполняются на ЭВМ, для чего разработаны соответствующие программные комплексы (ANSYS, Deform 3D и др.). Следует при этом отметить, что в практическом проектировании часто не требуется знания теоретических основ рассмотренных методов, однако для исследователя, применяющего в основном подобные методы в сложных малоизученных случаях, такое понимание является необходимым. По этой причине исследователь должен очень хорошо владеть методами исчисления матриц и обладать достаточно высокой компьютерной культурой, ибо без этого успешное применение численных методов невозможно.

8. ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

8.1. Общие сведения об изобретательской деятельности и патентовании

В главе 1 уже отмечалось, что научные исследования, расширяя и углубляя познание окружающего мира, создают условия для решения множества практических задач. Научные представления и способы решения различных технических проблем всегда были тесно связаны друг с другом и развивались как единое целое. Так, без понимания электричества невозможны были бы изобретения ни электрических двигателей, ни электрических осветительных систем, ни обогревательных устройств, ни электрических средств связи (телеграфа, телефона и др.). Без открытия электромагнитных волн были бы невозможны беспроводная радиосвязь, телевидение, радиолокация и т. д. и т. п. Решения практических задач зачастую требуют не меньших творческих усилий, чем сами исследования, на которых они базируются. Это могут быть не только рядовые догадки, но и гениальные решения, влияющие на развитие всего человеческого общества (микроскоп, паровая машина, радио, реактивные двигатели, лазеры и т. д.). В целом для исследователя, работающего в сфере технических наук, умение увязывать познавательную сторону НИР с решением практических задач является главным условием эффективности его исследований. По этой причине результатом НИР в сфере технических наук во многих случаях является не только научно-технический отчет, но и заявка (заявки) на предполагаемое изобретение, а иногда и уже полученные к моменту завершения НИР патенты. Иными словами, в сфере технических наук наибольший эффект достигается, когда исследователь одновременно является изобретателем.

В последние столетия деятельность по созданию новых устройств, способов действия, новых веществ и т. д. сформировалась в самостоятельное направление – в изобретательскую деятельность со своими правилами, ценностями, своей юридической базой. Такие правила возникли на основе обобщения многолетнего опыта инновационной деятельности в самых различных условиях. Они направлены на защиту авторских прав изобретателей, прав пользователей, на повышение эффективности изобретательской деятельности, на обеспечение справедливости во взаимоотношениях между участниками инноваций. Каждое развитое государство имеет свое патентное законодательство, упорядочивающее изобретательскую деятельность, защищающее права своих изобретателей и пользователей изобретений. Вопросам изобретательства посвящены ряд международных договоров и конвенций (Договор о патентной кооперации, Европейская и Евразийская конвенции и др.); функционируют различные международные организации, занимающиеся этими вопросами (Всемирная организация интеллектуальной собственности – ВОИС, Европейское патентное ведомство – ЕПВ и др.). В нашей стране правовые вопросы изобретательской деятельности регулируются (с 2008 г.) главой 72 Гражданского кодекса РФ (часть IV). Этому посвящено множество специальных и популярных книг, позволяющих начинающему изобретателю довольно быстро войти в курс дела и приобрести соответствующие навыки. В целом сложившиеся правила и система понятий (терминов) в разных странах различаются несущественно.

Результаты интеллектуальной деятельности, направленные на создание новых технических решений, разделяются по степени новизны на четыре уровня:

- изобретение, предполагающее наибольший (изобретательский) уровень новизны;
- полезная модель, предполагающая несколько меньший уровень новизны (например, новизна только в своей стране);
- промышленный образец, относящийся преимущественно к новому внешнему виду изделия;
- ноу-хау — минимальная новизна, не защищаемая патентами.

8.2. Изобретательство как исследовательский процесс

Результатами инженерного творчества чаще всего являются новые, более совершенные и эффективные технические объекты и технологии или, выражаясь языком патентоведов, новые устройства и способы.

Техническим объектом будем называть созданное человеком или автоматом реально существующее (существовавшее) устройство, предназначенное для удовлетворения определенной потребности. К техническим объектам можно отнести отдельные машины, аппараты, приборы, ручные орудия труда, одежду, здания, сооружения и тому подобные устройства, выполняющие определенную функцию по преобразованию объектов живой и неживой природы, энергии или информационных сигналов. К техническим объектам будем также относить любой из элементов (агрегат, блок, узел, деталь), из которых состоят машины, аппараты, приборы и т. д., а также любой из комплексов взаимосвязанных машин, аппаратов, приборов. Это может быть технологическая линия, цех, завод и т. п.

Как видно из определения, технический объект представляет собой весьма широкое понятие. Так, например, к техническим объектам можно отнести самолет и кофемолку, мачту линии электропередачи и лопату, ЭВМ и туфли, завод и выпускаемые им болты и гайки. Как синоним понятия «технический объект» в литературе часто используют еще понятие «техническая система».

Почти у любого технического объекта существует надсистема, т. е. другой технический объект, в который он функционально включается или входит как отдельный элемент.

Обработка вещества, энергии или сигналов представляет собой выполнение с помощью технических объектов некоторой четко определенной последовательности операций. В связи с этим технологией будем называть способ, метод или программу преобразования вещества, энергии или информационных сигналов из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с помощью определенных технических объектов.

Каждый технический объект может быть представлен описаниями, имеющими иерархическую соподчиненность. Описания характеризуются двумя свойствами:

1) каждое последующее описание является более детальным и более полно характеризует технический объект по сравнению с предыдущим;

2) каждое последующее описание включает в себя предыдущее.

Такие свойства имеют следующие описания: потребность, или функция технического объекта; техническая функция; функциональная структура; физический принцип действия; техническое решение; проект.

Потребность. Это общепринятое и краткое описание на естественном языке назначения технического объекта или цели его создания (существования). При описании потребности отвечают на вопрос: «Что (какой результат) желательно иметь (получить) и каким особым условиям и ограничениям при этом нужно удовлетворить?»

Если рассматривать более детально описание потребности, то оно должно включать следующую информацию:

- необходимое действие (наименование действия);
- объект (предмет обработки), на которое направлено это действие;
- особые условия и ограничения.

Наряду с понятием потребности в инженерной практике также широко используется понятие функции технического объекта. Описания потребности и функции технического объекта тождественно совпадают. Различие между потребностью и функцией состоит в том, что понятие потребности всегда связано с человеком или автоматом (коллективом людей, автоматов), поставившим задачу реализации потребности и выполняющим проектирование соответствующего технического объекта и его изготовление. Понятие функции всегда связано с техническим объектом, реализующим эту потребность.

Техническая функция. Описание технической функции содержит следующую информацию:

- потребность, которую может удовлетворить технический объект;

– физическая операция (физическое превращение, преобразование), с помощью которой реализуются потребности.

Функциональная структура. Подавляющее большинство технических объектов состоит из нескольких элементов (агрегатов, блоков, узлов), и они могут быть естественным образом разделены на части. Каждый элемент как самостоятельный технический объект выполняет определенную функцию и реализует определенную физическую операцию, т. е. между элементами имеют место два вида связей и соответственно два вида их структурной организации.

Элементы имеют определенные функциональные связи друг с другом, которые образуют конструктивную функциональную структуру. Конструктивная функциональная структура представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются наименования элементов, а ребрами – функции элементов.

Под физико-техническими эффектами будем понимать различные приложения физических законов, закономерностей и следствий из них, физические эффекты и явления, которые могут быть использованы в технических устройствах. Как правило, в физико-технических эффектах имеет место определенная причинно-следственная связь между «входом» и «выходом». Физико-технический эффект должен иметь стандартное формализованное (имеющее определенную структуру) описание, удобное для технических приложений и машинной обработки.

Физический принцип действия. Под физическим принципом действия будем понимать ориентированный граф, вершинами которого являются наименования физических объектов (В), а ребрами входные (А) и выходные (С) потоки вещества, энергии и сигналов.

Описание принципа действия, как правило, содержит изображение принципиальной схемы технического объекта, в которой в упрощенно-идеализированной форме показаны основные конструктивные элементы, обеспечивающие реализацию принципа действия, и указаны направления потоков и основные физические величины, характеризующие используемые физико-технические

эффекты. Принципиальная схема облегчает последующую разработку (конструирование) технического решения.

Техническое решение представляет собой конструктивное оформление физического принципа действия или функциональной структуры. Техническое решение конкретного технического объекта, как правило, описывается в виде двухуровневой структуры через характерные признаки технического объекта в целом и его элементов. При этом используют следующие группы признаков:

- указание (перечень) основных элементов;
- взаимное расположение элементов в пространстве;
- способы и средства соединения и связи элементов между собой;
- последовательность взаимодействия элементов во времени;
- особенности конструктивного исполнения элементов (геометрическая форма, материал и т. д.);
- принципиально важные соотношения параметров для технического объекта в целом или отдельных элементов.

В зависимости от вида рассматриваемого технического объекта элементом может быть часть детали, деталь, узел, блок, агрегат, техническая система, комплекс технических систем. При описании технического решения некоторых технических объектов может использоваться только часть признаков.

Техническое решение конкретного технического объекта может быть описано с любой степенью детализации. Для этого используют иерархический набор двухуровневых описаний технического решения, т. е. сначала описывают техническое решение устройства в целом, затем технические решения каждого блока, затем – каждого узла и т. д. Описание технического решения на естественном языке, как правило, дополняют его графическим изображением. Способы описания технических решений достаточно хорошо разработаны и изложены в методических и инструктивных материалах по патентоведению, поскольку во всех патентах и авторских свидетельствах на устройства дается описание прототипа и нового технического решения.

Техническое решение представляет собой как бы безразмерное описание технического объекта, которое может иметь самые

различные реализации по параметрам. К параметрам будем относить размеры технического объекта и его элементов, количественные характеристики входных и выходных потоков и другие важные измеряемые свойства технического объекта. Например, асинхронный электродвигатель при одинаковом техническом решении имеет десятки модификаций по размерам, силе тока, напряжению, частоте вращения, мощности и другим параметрам.

В отличие от технического решения в проекте указываются параметры технического объекта и всех элементов до деталей. Он содержит всю необходимую информацию для изготовления и эксплуатации технического объекта. В зависимости от сложности технического объекта описание проекта составляет от нескольких страниц до сотен томов, т. е. проекты технических систем – это многотомные уникальные собрания сочинений, недоступные широкому читателю, но, как правило, осязаемые в виде готовых изделий и сооружений.

8.3. Выбор аналогов технического объекта и его описание

Патентные исследования являются обязательной составной и неотъемлемой частью процесса выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектно-конструкторских работ, связанных с созданием новых объектов техники. В этих исследованиях, предусматриваемых в технических планах организаций и предприятий, принимают участие помимо самих разработчиков специалисты патентных и информационных подразделений.

Проведение патентных исследований обеспечивает повышение эффективности разработок и создает предпосылки для научно обоснованного планирования этих работ, освоения в производстве технических новинок, предотвращения дублирования разработок, а также правовую защиту конкурентоспособных технических решений и осуществление эффективных патентно-лицензионных и экспортно-импортных операций. Кроме того, оно позволяет целенаправленно управлять разработками в процессе их проведения.

Патентные исследования проводятся на всех стадиях разработки объекта. Их сущность заключается в проведении ряда последовательных исследований на всех стадиях НИР и ОКР, начиная от обоснования новой темы, включаемой в план работы организации, и кончая серийным производством и внедрением объекта разработки. При этом на каждой стадии специфика патентных исследований определяется целью и задачами их проведения и характеризуется различным объемом (по глубине, странам, рубрикам и т. д.) привлекаемой для исследования документации, методами анализа и выводами, которыми они завершаются.

Несмотря на различие в специфике патентных исследований, проводимых на различных стадиях создания объектов новой техники, основные элементы методики их выполнения во многих случаях одинаковы, например:

- Изучение исходной документации, имеющейся на данной стадии НИР и ОКР (материалов выбранной темы, программы, методики и отчетов о НИР, технического задания, эскизного или технического проекта, рабочей документации и т. п.).
- Установление целей и задач патентных исследований на каждой стадии разработки.
- Составление задания на проведение патентных исследований на данной стадии и разработка регламента поиска патентной и научно-технической информации, включающего в себя разделение темы НИР на основные направления, подтемы и другие составные элементы; разделение объекта ОКР на устройства, узлы, механизмы, отдельные технические решения и детали по их функциональным признакам (системное представление объекта); определение границ поисковой области, стран и глубины ретроспективы поиска информации; классификация основных направлений НИР или составных элементов ОКР по различным системам классификации изобретений; определение видов исследуемых документов и их местонахождения.
- Поиск и отбор документации.
- Систематизация отобранных информационных материалов по основным направлениям НИР или составным элементам ОКР.

- Изучение и анализ отобранной и систематизированной информации.

- Синтез новой информации.

- Обобщение и выводы.

- Составление отчетных документов.

Таким образом, патентные исследования представляют собой комплекс исследований, выполняемых разработчиком на различных стадиях НИОКР путем сопоставления определенных признаков или показателей разрабатываемого объекта с показателями аналогичных по назначению объектов, содержащихся в патентных и других источниках информации.

Информация об изобретениях является одним из основных видов научно-технической информации. Она обладает рядом специфических особенностей, которые выгодно отличают ее от других видов информации.

За время существования патентной системы образовался огромный фонд описаний изобретений, отражающих технический прогресс человечества. Этот фонд очень четко упорядочен национальными системами классификаций изобретений, принятыми в различных странах, а также единой Международной классификацией изобретений.

Международная классификация изобретений (МКИ) была разработана в связи с договоренностью европейских стран об унификации систем классификации изобретений. МКИ представляет собой 5-ступенчатую иерархическую систему. Общая укрупненная система классификации состоит из 8 разделов, 20 подразделов, 115 классов и 607 подклассов.

Восемь основных разделов МКИ обозначаются заглавными буквами латинского алфавита: А – удовлетворение жизненных потребностей человека; В – различные технологические процессы; С – химия и металлургия; D – текстиль и бумага; Е – строительство; F – прикладная механика, освещение, отопление; двигатели и насосы, оружие и боеприпасы; G – техническая физика; Н – электричество.

Классы разделяются на подклассы, которые обозначаются строчными буквами. Классы и подклассы МКИ составляют ее основную

схему. Подклассы делятся на две группы, обозначаемые, как правило, нечетными цифрами, а подгруппы – четными.

Первая подгруппа в каждой группе обозначается индексом 00. Она является запасной рубрикой для индексации таких изобретений, которые не могут быть индексированы с помощью последующих подгрупп данной группы. Этот прием дает возможность в дальнейшем создавать новые подгруппы без нарушения общей структуры системы.

Зависимость и подчиненность между группами и подгруппами МКИ дополнительно выражается смещением строк текста подчиненной подгруппы вправо с точками перед текстом. Степень подчиненности определяется величиной сдвига (числом точек). Одна точка означает, что рубрика (подгруппа) подчинена непосредственно группе, две – подгруппе с одной точкой и т. д.

Например: В92в, 1/00 предварительная обработка материалов перед формованием; /02 гранулирование, таблетирование, зернение; /03. образование зерен; /032... таблетирование; /04. смешивание, пластификация; /06.. устройства для смешивания при пластификации; /08... с перемешивающими вальцами; /10... с перемешивающими шнеками.

8.4. Основы создания патентоспособного технического объекта

При предварительной постановке задачи дается методика постановки самого широкого класса задач инженерного творчества, когда требуется улучшить известное устройство, называемое прототипом, внося в него определенные изменения.

Постановка задачи – нелегкая работа. Однако нужно всегда помнить, что правильная постановка творческой инженерной задачи – это половина ее решения. Она часто связана с отсечением многих бесперспективных и тупиковых направлений поиска. Нередки случаи, когда решение задачи находят в процессе ее постановки. Поэтому не следует экономить время на анализ и постановку

задачи, которая во многих случаях может содержать следующие операции.

Операция 1. Описание проблемной ситуации. Эта операция представляет собой самую краткую предварительную формулировку задачи, в которой должны содержаться ответы на следующие вопросы:

а) В чем состоит затруднение или проблемная ситуация и какова ее предыстория?

б) Что требуется сделать для устранения проблемной ситуации, т. е. какую потребность нужно удовлетворить?

в) Что мешает устранению проблемной ситуации или достижению цели?

г) Что дает решение задачи для людей, предприятия, народного хозяйства и т. д.?

Операция 2. Описание функции (назначения) технического объекта. Описание содержит четкую и краткую характеристику технического средства, с помощью которого можно удовлетворить возникшую потребность. При этом рекомендуется давать сначала качественное, а затем количественное описание функции, которую требуется реализовать с помощью разрабатываемого технического объекта.

Операция 3. Выбор прототипа и составление списка требований. В описании проблемной ситуации часто указывают прототип, который требуется усовершенствовать. Этот исходный прототип обычно приходится брать за основу при поиске улучшенного решения. Кроме этого, рекомендуется выбрать еще 1–2 дополнительных прототипа, имеющих определенные достоинства по сравнению с исходным. При этом в первую очередь используются существующие в практике изделия на уровне лучших мировых образцов, аналогичные технические решения в ведущем классе технического объекта. Ведущий класс технического объекта по сравнению с рассматриваемым имеет близкую функцию и более высокий технический уровень. Например, для автомобилестроения ведущим классом может быть авиация, для строительства – машиностроение.

При выборе дополнительных прототипов рекомендуется использовать словари технических функций, МКИ (международную

классификацию изобретений). Патентные описания за последние 5–10 лет (как по рассматриваемому, так и функционально близким классам технического объекта), каталоги выставок и т. д.

Иногда при выборе прототипа удается найти подходящее решение и тем самым снять проблемную ситуацию. В этом случае при дефиците времени и ресурсов можно прекратить решение задачи поиска улучшенного технического решения. Однако при наличии времени почти всегда имеет смысл и есть возможность улучшить найденное решение и тем самым отодвинуть время возникновения новой проблемной ситуации.

Операция 4. Составление списка недостатков прототипа. Как следует из закона прогрессивной конструктивной эволюции технического объекта, каждый используемый технический объект обычно имеет некоторый список недостатков, устранение которых обеспечивает получение новой улучшенной модификации технического объекта. При выполнении этой операции необходимо стремиться выявить все недостатки прототипа, которые могут быть устранены в новом изделии, т. е. для каждого прототипа следует указать:

- критерии развития технического объекта;
- показатели, не соответствующие сформулированной функции;
- факторы, снижающие эффективность или затрудняющие использование прототипа;
- показатели, которые желательно улучшить.

Полученный список недостатков необходимо упорядочить по степени важности их устранения и выделить самые важные недостатки, устранение которых будем считать главными целями решения задачи.

Операция 5. Предварительная формулировка задачи. Кратко обобщаются результаты, полученные при выполнении операций 1–4. При этом задача традиционно содержит две части: «дано» и «требуется». Такое обобщение дает комплексное и легко обозримое представление о задаче, что способствует продуктивной работе.

Операция 6. Анализ функций прототипа и построение улучшенной конструктивной функциональной структуры. Анализ функций прототипа и построение его конструктивной функциональной структуры выполняется в соответствии с рекомендациями.

После этого проводят корректировку (улучшение) функциональной структуры, для чего необходимо ответить на вопросы:

а) Какие можно ввести новые функциональные элементы, обеспечивающие устранение недостатков прототипа или существенное повышение эффективности и качества технического объекта? Дают название таким элементам и описывают их функции.

б) Какие можно исключить элементы для устранения недостатков прототипа или повышения эффективности и качества технического объекта?

в) Какие элементы целесообразно исключить путем передачи их функций другим элементам?

г) Для каких элементов, имеющих несколько функций, целесообразно разделение функций и введение вместо одного и двух или более элементов? Дают названия новым элементам и описывают их функции.

После ответа на перечисленные вопросы строят улучшенную конструктивную функциональную структуру. При этом возможны ситуации, когда не удастся изменить функциональную структуру прототипа или появляется несколько альтернативных улучшенных функциональных структур.

Операция 7. Анализ функций вышестоящей по иерархии системы. Почти всегда рассматриваемый технический объект можно представить как элемент в другой, более сложной технической системе (например, деталь в узле, узел в машине, машина в технологической линии цеха и т. д.).

Для анализа необходимо:

- Выделить вышестоящую по иерархии систему, в которой в качестве отдельных элементов (подсистем) выступают рассматриваемый технический объект и другие смежные с ним объекты (другие технические объекты, окружающая среда, человек и т. д.).
- Описать функции всех элементов, входящих в выделенную систему, и построить конструктивную функциональную структуру.
- Выяснить возможность удовлетворения потребности, т. е. можно ли выполнить функцию рассматриваемого технического

объекта путем внесения изменений в смежные объекты; нельзя ли какому-либо смежному объекту частично или полностью передать выполнение функции рассматриваемого технического объекта; что мешает внесению необходимых изменений и нельзя ли устранить мешающие факторы.

- Сформулировать по аналогии с операцией 5 задачу внесения изменений в смежные объекты. Провести технико-экономическое сравнение первоначальной постановки задачи по операции 5 с задачей внесения изменения в смежные объекты. Если последняя более эффективна, то следует проработать ее по операциям 1–6.

Операция 8. Выявление причин возникновения недостатков. Проводятся более углубленный анализ и изучение задачи в направлении выявления причин возникновения недостатков в прототипе, сформулированных при выполнении операции 4.

Следует сопоставить каждый недостаток и причину его возникновения и попытаться ответить на вопрос: можно ли полностью или частично избавиться от недостатка, исключив причину его возникновения?

Операция 9. Выявление и анализ противоречий развития. Улучшение показателей во многих технических объектах связано с преодолением так называемых противоречий развития, которые могут иметь место в следующей типичной ситуации.

Улучшение какого-либо желаемого показателя технического объекта приводит к существенному ухудшению одного или нескольких других важных показателей (например, увеличение грузоподъемности моста приводит к увеличению расхода материалов; снижение помех от деформации антенны радиотелескопа приводит к резкому повышению стоимости антенны).

Возможно и другое противоречие развития, когда улучшение желаемого показателя ограничено некоторым фактором, например, увеличение диаметра и частоты вращения бегуна и поставка водяной мельницы в Средние века ограничивалось прочностью и конструкцией деревянных водяных колес; возрастание быстродействия ЭВМ ограничено скоростью передачи сигналов внутри машины.

При выявлении и анализе противоречий развития выполняют следующие процедуры:

- Из списка недостатков прототипа, выявленных в операции 4, выбирают недостатки, связанные с улучшением количественных показателей и в первую очередь относящиеся к критериям развития технического объекта.
- При рассмотрении каждого такого показателя отвечают на вопросы, какой показатель технического объекта существенно ухудшается при улучшении рассматриваемого показателя; какие факторы (константы, стандарты и т. д.) ограничивают улучшение желаемого показателя.
- Строят качественный или количественный график зависимости ухудшаемого показателя от улучшаемого.

При выполнении п. 3 рекомендуется использовать программы и системы математического моделирования технического объекта.

Операция 10. Уточнение списка прототипов и формирование идеального технического решения. Выявление и анализ недостатков прототипа (операции 4, 8, 9), анализ функций прототипа и вышестоящей системы (операции 6, 7) значительно расширяют представление о задаче и требованиях к прототипу. В связи с этим целесообразно еще раз вернуться к выбору наиболее подходящего прототипа для разработки улучшенного технического объекта и использовать рекомендации, данные в операциях 3, 6, 7. Кроме того, полезно сформулировать и представить идеальное техническое решение.

К одному из приемов, помогающих выбору нового технического решения на главной магистрали развития, относится формулировка идеального технического решения (ИТР), которое конструкторы и изобретатели называют по-разному: идеальный конечный результат, идеальная машина, предельно совершенное устройство и т. д. Идеальное техническое решение является как бы ориентиром для выбора прототипа и конструирования улучшенного технического объекта.

Определение идеального технического решения (ИТР).

Будем считать техническое решение идеальным, если оно имеет одно или несколько из следующих свойств:

- в ИТР размеры технического объекта приближаются или совпадают с размерами обрабатываемого или транспортируемого объекта, а чистая масса технического объекта намного меньше массы обрабатываемого объекта;

- в ИТР масса и размеры технического объекта или его главных функциональных элементов приближаются к нулю, а в предельном случае равны нулю (когда устройства вообще нет, но необходимая функция выполняется);

- в ИТР время обработки объекта приближается к нулю или равно нулю;

- в ИТР КПД приближается к единице или равен единице, а расход энергии приближается к нулю или равен нулю;

- в ИТР все части технического объекта все время выполняют полезную работу в полную меру своих расчетных возможностей;

- технический объект, имеющий ИТР, функционирует без человека или при его минимальном участии;

- технический объект, имеющий ИТР, функционирует бесконечно длительное время без ремонта и остановок;

- технический объект, имеющий ИТР, не оказывает никакого отрицательного влияния на человека и окружающую природную среду.

Операция 11. Улучшение других показателей технического объекта. При разработке новой модели или нового поколения технического объекта стремятся сделать изделия, которые не только бы устраняли главные видимые недостатки (определенные в операции 4), но и имели значительные преимущества перед существующими изделиями по комплексу всех существенных показателей. Поэтому по отношению к выбранным в операции 10 прототипам рекомендуется провести анализ и ответить на вопросы:

- а) Какие еще можно устранить недостатки в прототипе?
- б) Какие показатели могут быть дополнительно улучшены и насколько?

При ответе на эти вопросы следует рассмотреть возможности улучшения средств выполнения функций, сформулированных в операциях 6, 7; устранения недостатков, выявленных в операциях 8, 9; приближения к идеальному техническому решению.

При выполнении этой операции следует также учесть рекомендации, указанные в операции 4. Кроме того, полезно использовать существующие (а также самим составлять и развивать) проблемно и объектно ориентированные списки критериев развития технического объекта, списки параметров технического объекта и списки требований к техническому объекту.

Операция 12. Изложение уточненной постановки задачи. По форме она излагается, как и предварительная постановка задачи (операция 5). При этом к исходным данным относятся:

- качественное и количественное описание функции технического объекта;
- перечень и краткое описание прототипов, к которым могут быть отнесены улучшенные функциональные структуры, идеальные технические решения и списки основных требований к прототипам;
- списки главных недостатков прототипов с указанием неочевидных причин возникновения недостатков;
- списки дополнительных недостатков и показателей, которые желательно улучшить;
- формулировка противоречий развития прототипов.

8.5. Обеспечение изобретательского уровня технической разработки

Методы поиска изобретательских идей в процессе научно-технического творчества сегодня особенно актуальны, ибо только после нахождения такой идеи проводится детальное конструирование машины либо изделия. Если лет двадцать назад в стране оспаривались возможности и надобность таких методов, то сегодня необходимость их изучения не подлежит сомнению.

Так как в настоящее время изобретательское творчество становится все более массовым, возникла потребность создания методов, основанных на законах творчества и логики мышления, с тем, чтобы можно было обучать этим методам широкие массы интересующихся.

Известно несколько десятков методов решения изобретательских задач. Наиболее эффективными признаны морфологический метод, методы фокальных объектов, мозгового штурма, контрольных вопросов, а также комплексный метод, разработанный в рамках так называемой теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [3].

Как отмечено выше, изобретательская деятельность обычно не выделяется в самостоятельный вид работ, в котором возможно обычное планирование, регулирование и тем более получение точно намеченного результата. Она выполняется в основном в рамках запланированных научно-исследовательских работ (НИР) или опытно-конструкторских разработок (ОКР), не являясь обязательным их элементом. Изобретения получают далеко не в каждой НИР или ОКР, но если это удастся, то ценность проведенной работы существенно повышается (обычно говорят, что работа выполнена на уровне изобретения). Значимость конкретного изобретения проявляется, как правило, в комплексе с другими изобретениями, охватывающими разные стороны решаемой практической проблемы. Совокупность дополняющих друг друга изобретений может стать крупным шагом в развитии конкретной отрасли промышленности или даже нескольких отраслей.

В условиях, характерных для всех современных развитых стран, где экономика развивается в основном за счет инновационных процессов, особенно возрастает потребность в изобретениях. Их количество и эффективность становятся важнейшими факторами, определяющими темпы развития экономики. Это заставляет специалистов постоянно задумываться над повышением эффективности изобретательской деятельности. Все более востребованными становятся книги и статьи, в которых опытные изобретатели обобщают свой опыт и дают рекомендации начинающим изобретателям. Радикально меняется сам взгляд на изобретательскую деятельность.

Поставлено под сомнение традиционное представление об изобретательстве как о деятельности неуправляемой, представляющей удел немногих, некий природный дар, непостижимую «искру божью». Такое сомнение, как и идея возможности обучения изобретательству, высказывались еще в начале XIX в., но до XX в. они не привлекали внимания широких кругов специалистов. Однако начиная с середины XX в. новые взгляды все более вытесняют традиционную точку зрения. Сторонники нового подхода отвергали «непостижимость» творческой деятельности, считая процесс решения изобретательских задач не только познаваемым, но и поддающимся совершенствованию. Основываясь на обобщении опыта предшествующих поколений изобретателей, они стали предлагать различные схематизированные приемы решений изобретательских задач, способных существенно повышать продуктивность работы начинающих изобретателей.

Как и все новые идеи, предлагаемые подходы вызывали разноречивые оценки, порождали оживленные дискуссии, способствовали выходу новых публикаций. В обсуждение вовлекались не только изобретатели, но и психологи, философы. К началу XXI в. число публикаций по вопросам методики технического творчества превысило двадцать тысяч, предложено около тридцати оригинальных методик и более трехсот конкретных методов решения изобретательских задач.

Исключительно большой интерес такие проблемы вызывали в бывшем СССР, где систематически проводились научно-практические конференции и семинары по вопросам изобретательства, организовывались специальные курсы по обучению изобретательству, большими тиражами выходили научно-популярные книги по этим вопросам. Особенно большую организационно-просветительскую работу в этом направлении проводил советский инженер-изобретатель Г. С. Альтшуллер [3], популярные книги которого не утратили своей актуальности до настоящего времени.

Все предлагаемые в последние десятилетия подходы основаны на рассмотрении процесса решения изобретательских задач как некоторой технологии интеллектуальной деятельности, предпола-

гающей определенную систему в действиях изобретателя, схематизацию выполняемых им логических процедур. Они направлены на преодоление инерции мышления и всевозможных психологических барьеров, вносят четкость и упорядоченность в рассуждения лица, решающего задачу, оптимизируют последовательность его действий. Вместо метода проб и ошибок, т. е. бессистемного перебирания возможных вариантов решения, предлагается выбирать приемлемое решение более эффективными схематизированными («стандартными») способами.

Примером может служить подход, разработанный в бывшем СССР и известный как теория решения изобретательских задач – ТРИЗ (основной разработчик Г. С. Альтшуллер). Первоначально общие идеи упомянутого подхода были опубликованы в 1946 г., но как целостная система ТРИЗ стала известна с 1956 г., после чего она неоднократно модернизировалась. Модернизация ТРИЗ шла в направлении не только уточнения основных идей, но, к сожалению, и в направлении ее усложнения, что в определенной мере создавало затруднения для пользователей. В этой связи для первоначального общего ознакомления удобно рассматривать основные приемы ТРИЗ не по последней ее модификации (1985), а по более ранним вариантам, в которых полезные идеи проявляются более просто и четко.

Действия пользователя ТРИЗ (инженера, решающего изобретательскую задачу) разбиваются на этапы, которые, в свою очередь, разделяются на отдельные шаги. Для этого разработана система наводящих (контрольных) вопросов, таблиц, образующих специальный алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ).

Пока не были известны методы творчества, о трудности изобретательской задачи судили по продолжительности времени ее решения. В настоящее время, по мере улучшения эффективности методов творчества, время поиска новых технических решений значительно сократилось. Однако сложные методики чаще всего пугают изобретателей, вследствие чего они отказываются от их усвоения. Наиболее простыми представляются метод развития изобретательских идей и комбинаторный метод.

Методом развития изобретательских идей могут пользоваться почти все желающие изобретать, он не требует большой методической подготовки и способствует расширению массового творчества в области технических изобретений. Данный метод позволяет в наибольшей степени выявить индивидуальные способности решающего. Он предусматривает надежность поиска даже при непонятной сути задачи. Решение можно найти с помощью метода обмена энергии поля, анализа и синтеза элементов (с их признаками) и др. Кроме того, этот метод позволяет выбрать и остановиться не на единственном элементе объекта или его части, а рассмотреть изменения всех его существенных элементов, что способствует нахождению нескольких ответов.

При решении задачи описываемым методом применяется столько приемов, сколько их знает специалист, решающий эту задачу. Поэтому данным методом могут пользоваться не только хорошо знакомые с методами творчества изобретатели, но и начинающие. Однако больший успех достигается при знании методов и приемов.

Суть метода развития изобретательских идей состоит в том, что процесс решения изобретательской задачи разделяется на две части: подготовку к поиску идеи и поиск идеи. При подготовке задачи к поиску идеи выдвигается неполная идея без осмысления ее осуществимости, а при поиске идеи неполная идея развивается до полной. Заканчивается это развитие осмыслением конструктивной схемы для осуществления идеи.

Второй метод – комбинаторный – относится к группе морфологических. По сравнению с другими разновидностями морфологического метода, комбинаторный метод имеет ряд преимуществ. К ним относятся, прежде всего, простота и доступность метода, а также его эффективность.

Прежде чем оформить изобретательскую идею в виде заявки на изобретение, необходимо ознакомиться с патентной литературой для уточнения аналогов и выбора прототипа, а также для выяснения, не известно ли подобное решение задачи. Начинающему изобретателю после ознакомления с условием задачи рекомендуется поработать с патентной литературой. При чтении патентной

литературы можно убедиться, как легко и просто (иногда без отраслевых знаний) другие изобретатели решили подобную задачу. Это обычно поднимает творческое настроение.

Изобретателю обычно рекомендуется читать патентную литературу не только для того, чтобы до работы над созданием изобретения посмотреть, что сделано по данной теме, но и для повышения своего творческого потенциала (для переноса решений в другую область, для развития фантазии и т. д.). С этой целью следует постоянно читать периодическую патентную литературу по различным отраслям знаний.

Недостаточно знать методы изобретательства. Творческие успехи во многом зависят от настроения, бодрости, трудоспособного времени суток (одни люди трудолюбивы утром, другие – вечером), от скорости втягивания в работу и т. д. Трудоспособные часы обычно соответствуют ежедневному ритму деятельности.

Для создания благоприятного творческого настроения необходимо регулярно следить за техническими новинками. С целью экономии времени следует читать не всю техническую информацию, а только ту, в которой описывается, по какому принципу объект работал раньше и по какому работает сейчас. Повышению творческого уровня помогает решение учебных и производственных изобретательских задач.

В данное время увеличился объем публикаций по методам изобретательства, поэтому изобретателю нелегко изучить все методы, особенно сложные. Следовательно, до решения задачи методом развития изобретательской идеи хорошо было бы изучить перечни творческих приемов, физических эффектов и явлений, стандартов на творчество.

Цель изобретения определяется целью разработки нового технического средства. Приступая к разработке нового технического средства, разработчик всегда ставит перед собой конкретную цель, которая отображает полезный конечный результат, достигаемый с использованием проектируемого средства: повышения производительности, КПД, выхода продукта и т. п.

Цель изобретения должна быть выражена как можно конкретнее и должна включать указание на технический эффект. Формулировка цели изобретения может отличаться от цели разработки.

Примером конкретных формулировок цели изобретения могут служить: «с целью уменьшения напряжения в стенках аппарата», «с целью получения импульса прямоугольной формы», «с целью удаления влаги с поверхности», «с целью исключения коррозии в местах контакта элементов» и т. п.

Творческую работу по подготовке задачи к поиску новых идей для ее решения и сам поиск изобретательских идей можно разделить на 13 этапов:

1. Формулировка условия задачи. Условия задачи чаще всего формулируют неправильно: указывается узел или деталь, которые надо изменить. На самом деле часто приходится изменять другое, например, способ производства. Поэтому в условиях задачи надо указывать не подлежащие для изменения узел или деталь, а указать плохие характеристики объекта. Для улучшения этих характеристик изобретатель чаще всего изменяет совсем не то, что указано в условиях.

Кроме того, условия задачи должны быть сформулированы так, чтобы по ним можно было представить себе конструктивную схему объекта, принцип его действия и по этим данным его начертить. При этом сборочный рабочий чертеж не годится, ибо в нем одни детали заслоняют другие, поэтому предпочтительнее аксонометрический вид или кинематическая схема. Условия изобретательской задачи, как правило, неполные. Если они полные, то такую задачу обычно решают логическим путем, поэтому она не считается изобретательской.

2. Составление эскиза по условию задачи. При составлении эскиза нельзя пропускать основных предметов (в том числе опоры, направления движения, направления сил, натяжения и др.). Надо изобразить минимальное количество элементов (узлов, деталей) и связей между ними, без чего невозможно представить себе принцип действия объекта. Изображаемые элементы должны быть причинно взаимосвязаны, т. е. составлять систему (если графически

будет пропущен хотя бы один существенный элемент, в лучшем случае будет пропущено несколько интересных решений).

Чертить надо предельно упрощенно, однако полезно показывать вторую, иногда и третью проекцию. Эскиз разработки также необходим, ибо он облегчает представление объекта, исключает пропуск существенных признаков (узла, детали). Надо помнить выражение: «Лучше иметь небольшой чертеж, нежели сотни слов».

3. Уяснение сути задачи. Суть задачи всегда скрыта (иначе не было бы самой задачи). Чтобы понять суть задачи, необходимо вникнуть в ее условие, особенно внимательно изучить эскиз. Одной логики недостаточно (ее использовали и другие решающие). Понять суть задачи помогают производственный и жизненный опыт, образование, уверенность в том, что задачу можно решить. Глубокому пониманию помогают также отказ от неперспективных направлений; новая компоновка имеющихся признаков (узлов, деталей); введение минимального количества новых функциональных признаков (вместо имеющихся, дающих отрицательный эффект); определение слабых мест объекта, которые укажут направление решения; рассмотрение физических процессов, происходящих со стороны обрабатывающего инструмента и изготавливаемого изделия и ряд других.

4. Выражение желаний. Суть задачи часто бывает трудно уяснить; иногда она остается непонятной или понимается ошибочно. В таком случае помогают творческие желания, которые при известном эвристическом подходе легко возникают и без понимания сути.

Выраженные желания не конкретизируются, ибо в данное время следует стараться записать как можно больше желаний (конкретизация этому мешает).

При выражении желаний надо мыслить глобально, не беспокоясь о том, как будет достигнуто исполнение желания.

На данном этапе происходит увеличение степени идеальности ранее понятой сути: считается, что система должна работать без посторонней помощи (таким образом, появляется возможность упрощения решения); создаются предпосылки к появлению новых желаний.

Выявлением желаний продолжается процесс преодоления психологической инерции, начавшийся на этапе выяснения сути. Неизвестно, можно ли решать поставленную задачу, но всегда можно высказать желания. Это очень важно. Специалисты отрасли часто не могут выразить желаний, ибо они им на первый взгляд кажутся нереальными, поэтому они от них сразу отказываются. Однако положение улучшается при разделении процесса мышления на две части: сначала выражение желания, затем поиск реальных путей для его осуществления.

Желания выражаются смело, хотя возможности для их реализации еще не видны. Это нелегко, ибо если искать пути для реализации желания, то, во-первых, не хватит смелости для формулировки желания, а во-вторых, после выражения желания начинается поиск реальной основы для его реализации, что неуместно. Если на других этапах решения задачи появляются новые желания, то они также записываются.

5. Предвидение возможного обмена энергии поля. Без энергии отсутствует движение. Недостатки объекта часто можно устранить изменением вида применяемой в нем энергии поля или иным ее преобразованием. Поэтому рассматриваются следующие способы воздействия на объект: изменение способа передачи той же самой энергии поля; изменение формы передачи той же самой энергии поля; другие способы изменения той же самой энергии поля, например, распределение энергии; временное или постоянное гашение энергии.

Кроме того, данный этап включает изменение направления движения, изменение химического взаимодействия и др. На данном этапе предусматривается только направление обмена, а не поиск конкретного способа использования.

6. Перечисление элементов (деталей) объекта и их свойств. Системы (если их несколько в объекте) распределяются на элементы (узлы, детали) для определения их главных и вспомогательных функций. Функция может выполняться объектом, имеющим различную структуру или вид энергии поля.

При поиске новых решений могут быть использованы свойства элементов: масса, длина, площадь, объем, электрическое сопротивление, сила электрического тока, давление, температура, магнитная индукция, скорость, мощность и др.

7. Рассмотрение других приемов. Средой в эвристике считается материя, в которой находится объект. Это – вакуум, воздух, пар, газ, вода, масло, сыпучий материал и т. д. На данном этапе приходится изменять среду, ее свойства или определять неизвестную среду.

Часто приходится искать такую среду, которая обладает нужными нам свойствами, хотя еще неизвестно, поможет ли она решить нам задачу (на данном этапе конкретного решения еще не следует искать).

8. Исполнение желаний. На этом этапе для каждого желания существует несколько конкретных вариантов решений (их количество и качество зависят от имеющихся знаний). Эти варианты и будут изобретательскими идеями, развитием которых до конструктивной схемы достигается изобретательское решение. Если задача уже решена, продолжение ее решения на других этапах не обязательно.

9. Обмен энергии поля. Этот этап применяется тогда, когда идея не найдена в ходе выполнения этапа 8. Идею можно получить при конкретизации воздействий на объект, перечисленных на этапе 5. Энергия при ее передаче одновременно поддерживает связь между узлами и деталями объекта.

10. Анализ и синтез элементов и их свойств. Этап применяется тогда, когда идея не найдена на прежних этапах.

В изобретательстве синтезом считается согласование изменяемого элемента со всем объектом; объединение нескольких элементов и их свойств в одну систему, опираясь на которую, удастся решить задачу.

При анализе элементов, перечисленных на этапе 6, данные обобщаем так, как будто каждый элемент объекта одинаково важен для решения задачи. Если при изменении одного элемента (например, узла) задача не решается, объединяются уже измененные несколько узлов. Если анализ отдельных элементов не дает резуль-

тата, то элемент рассматривается совместно с его свойствами (они были перечислены на этапе 6). При нахождении интересных идей может быть изменена и основная функция объекта.

На данном этапе хорошие результаты достигаются тогда, когда в системе имеется не более десяти элементов. Если этих элементов больше, трудно определить, какой элемент целесообразно изменять (тогда этапы 6 и 10 следует пропускать).

11. Применение других методических приемов. Когда идея не найдена на прежних этапах, применяются другие методические приемы, при использовании которых можно найти идею. По сравнению с этапом 7 на этапе 11 данные идеи конкретизируются.

12. Выбор оптимальных решений. При наличии идеи ее следует развивать. Зачастую это помогает найти более эффективное решение по сравнению с уже имеющимся решением.

При оценке найденных идей определяется лучшая из патентоспособных идей. При составлении эскизов для вариантов и при их сравнении возникают идеи по их усовершенствованию. Не следует ограничиваться одним решением, ибо для одних условий пригодно одно, для других – другое решение, которое может быть также патентоспособным. «Широкий взгляд с высоты» на решение и известные правила помогут составить формулу изобретения.

13. Применение найденной идеи для решения других задач. Такой поиск обычно помогает сделать изобретения в других областях.

При решении изобретательской задачи нельзя мыслить поверхностно, утешая себя тем, что впереди еще много возможностей, что если не на первых, то на последних этапах можно решить задачу. В таком случае мышление становится более интенсивным по мере приближения к последним этапам.

Иногда, не добившись результатов, кончают решения методом проб и ошибок, что нежелательно. Поэтому внимание должно быть сосредоточено на получении решения на первых этапах. Если от решения задачи не отказываются после первого или второго препятствия и верят в успех, то, как показала практика, оно часто получается патентоспособным.

Очередность этапов 5–7 между собой может быть изменена так же, как и этапов 9–11. На решение задачи положительно действует то обстоятельство, что выражение желаний (этап 4) отделено от их исполнения (этап 8) другими методическими приемами, благодаря чему изобретатель подходит к этапу исполнения желаний с новыми мыслями и средствами для их реализации.

8.6. Патент на изобретение, полезную модель, промышленный образец

Право на изобретение, полезную модель, промышленный образец охраняется государством и удостоверяется патентом.

Патент на изобретение, полезную модель, промышленный образец удостоверяет авторство, приоритет изобретения, полезной модели, промышленного образца и исключительное право на их использование.

Изобретением называют техническое решение, обладающее достаточной (изобретательской) новизной и полезностью, пригодное для многократного применения. Для того чтобы предложенное решение было признано изобретением, его необходимо изложить по специальным правилам (составить заявку) и послать на экспертизу в Российское патентное ведомство (Роспатент). В случае положительного решения патентного ведомства автору или его организации (если заявка исходила не от автора, а от организации) выдается специальный документ – патент. Он означает, что никто не имеет права бесплатно использовать данное изобретение: с обладателем патента (патентообладателем, патентодержателем) необходимо заключить соответствующий договор и платить ему за использование патента либо единовременно, либо отчислять определенный процент от получаемой прибыли, связанной с этим патентом. Контроль соблюдения этого правила внутри страны осуществляют правоохранительные органы государства, на международной арене – соответствующие международные организации (ВОИС, ЕПВ и др.).

Осведомленность начинающего изобретателя в вопросах патентного права и общая патентная культура имеют большое значение не только для него самого, но и для его страны. Анализируя развитие отечественной техники, легко убедиться, что невнимание к вопросам патентования неоднократно наносило серьезный урон престижу нашей страны. Так, в 1763 г. И. И. Ползунов впервые в мире разработал проект универсального парового двигателя, который он изложил в специальной докладной записке. До этого примитивные паровые двигатели были известны (с 1698 г.), но они были пригодны лишь в качестве насосов для откачки воды. В 1765 г. универсальный паровой двигатель был изготовлен и испытан, а с 1766 г. паровая машина И. И. Ползунова начала эксплуатироваться на одном из рудников Урала. Примерно в это же время (1763–1774) в Англии Дж. Уатт разработал аналогичную универсальную паровую машину, но, в отличие от И. И. Ползунова, он ее сразу же запатентовал (в 1769 г.), в результате чего весь мир за пределами нашей страны считает Дж. Уатта изобретателем паровой машины. И. И. Ползунова за рубежом практически никто не знает. Стоящая в Политехническом музее в Москве модель паровой машины И. И. Ползунова (сделанная через много лет после его смерти), естественно, никого не убеждает. В такой ситуации была повинна в основном существовавшая тогда система, ибо вопросы защиты авторских прав мало волновали современников И. И. Ползунова: первый патентный закон в России вышел через полвека после упомянутого изобретения паровой машины.

Еще более ярким примером можно считать изобретение радио. 7 мая 1895 г. (24 апреля по старому стилю) на заседании Русского физико-химического общества в Санкт-Петербурге российский физик-электрик А. С. Попов сделал научный доклад об изобретении им системы связи без проводов и продемонстрировал работу сделанного им соответствующего прибора. Содержание доклада через неделю было опубликовано в газете (в сокращенном виде), а спустя 4–5 месяцев полный текст доклада появился в научном журнале. Приемник А. С. Попова демонстрировался на Всемирной выставке в Париже в 1900 г. и получил Большую золотую медаль. Тем

не менее патентования беспроводной связи не было сделано. Через полгода после научного доклада А. С. Попова итальянский инженер Г. Маркони патентует свой беспроводной передатчик, принципиально не отличающийся от передатчика А. С. Попова, в результате чего весь мир за пределами нашей страны считает Г. Маркони изобретателем радио.

Такая же судьба постигла многие другие изобретения, сделанные в нашей стране. В советский период патентная активность отечественных специалистов существенно возросла, и СССР в 1970–1980-е гг. занимал в этой сфере одно из ведущих мест в мире. Однако начиная с 1990-х гг. началось снижение патентной активности (в 2006 г. Россия уже опустилась на 21-е место в мировом рейтинге). Все это указывает на необходимость повышенного внимания со стороны начинающих исследователей к вопросам патентования, по крайней мере, в сфере технических наук, иначе приведенные выше примеры в будущем будут многократно повторяться в самых различных формах. Круг правовых и технических вопросов, которые необходимо для этого освоить, довольно широк. Подобные вопросы объединяются в виде специальной дисциплины патентоведения, которая изучается в большинстве технических вузов. Далее приводятся некоторые сведения, наиболее важные для понимания этой дисциплины.

Перед подачей заявки на выдачу патента на изобретение необходимо убедиться, что предлагаемое решение не выдвигалось ранее другими авторами (ни отечественными, ни зарубежными!). Для этого нужно просмотреть зарегистрированные в данной отрасли патенты за последние 20 лет по 10 странам. Для обеспечения такой возможности периодически (обычно ежемесячно) выходят специальные журналы, в которых публикуются сведения об изобретениях. К ним относятся:

- бюллетень изобретений и открытий;
- реферативный журнал «Изобретения стран мира»;
- реферативные журналы ВИНИТИ.

Работа по изучению патентов и выяснению новизны выдвинутого предложения называется патентным поиском. Результаты патентного поиска в обязательном порядке прилагаются к заявке.

В крупных организациях обычно имеются патентные отделы, в которых информация об изобретениях хранится в систематизированном виде, удобном для проведения патентного поиска, т. е. в виде картотек, компьютерных баз данных, составленных на основе изучения упомянутых выше журналов. Такая информация обычно ограничена лишь специальностью организации. В системе Роспатента имеется Всероссийская патентно-техническая библиотека (ВПТБ). На сегодняшний день в фондах патентно-технической библиотеки собрано более 95 млн описаний изобретений, авторских свидетельств, патентов и патентных заявок. Всероссийская патентно-техническая библиотека предоставляет информацию о патентных документах 79 стран и 7 международных патентных ведомств.

Оформление и подача заявки на выдачу патента на изобретение может производиться как самим автором предполагаемого изобретения (или авторами, если их несколько), так и организацией-работодателем, от имени которой автор предпочитает действовать. Заявителем может быть и любое третье лицо, которому доверяет автор (правопреемник автора). Если заявителем является организация-работодатель, автор заключает договор с такой организацией, в котором оговаривается, как будет распределяться вознаграждение за использование изобретения (например, автору 95 %, а организации 5 %). Патент будет выдаваться не самому автору, а этой организации, которая в таком случае будет именоваться патентообладателем (патентодержателем). Авторские права изобретателя при этом сохраняются независимо от того, становится ли патентообладателем сам автор или его организация.

В соответствии с существующим законодательством выделяются следующие объекты изобретения:

- устройство;
- способ;
- вещество;
- использование известного решения по новому назначению;
- биологические объекты – штаммы бактерий, культуры клеток тканей органов растений или животных, генетические конструкции (плазмиды, векторы, стабильно трансформированные клетки и т. д.).

В какой бы области деятельности ни делалось изобретение, оно по своему содержанию (объекту изобретения) всегда относится к одной из перечисленных разновидностей.

Как уже отмечалось выше, кроме изобретений, новые решения могут иметь значительную практическую ценность, не обладая изобретательской новизной. Под изобретательским уровнем новизны подразумевается такое решение, которое не вытекает явным образом из существующего уровня техники и требует от специалиста значительного творческого усилия, причем ранее это решение никем в мире не предлагалось. Отличие от прототипа должно быть существенным. Тем не менее в настоящее время стало очевидным, что правовую защиту должны иметь не только решения, представляющие собой существенные достижения, т. е. соответствующие изобретательскому уровню новизны, но и простые улучшения известных устройств, в которых творчество проявляется не столь ярко. Это защищаемые патентами полезные модели, промышленные образцы и не защищаемые патентами ноу-хау.

Полезная модель – это новое промышленно применимое техническое решение, не обладающее изобретательским уровнем новизны и относящееся к устройству. Как и изобретение, полезная модель представляет новое техническое решение, но оно ближе к простому улучшению, рационализации известного решения, которое для специалиста не требует такого творческого усилия, какого требует изобретение. Отличие от прототипа не обязательно должно быть существенным. Достаточно, чтобы это решение было просто неизвестным отечественным специалистам. При этом в уровень техники, относительно которого оценивается новизна полезной модели, не включаются сведения об открытом применении за рубежом устройств такого же назначения. По этим причинам полезные модели часто называют «малыми изобретениями».

Очевидно, что различие между полезной моделью и изобретением в значительной мере условно. Любое изобретение, относящееся к устройству, может быть идентифицировано как полезная модель, но не всякая полезная модель может признаваться изобретением. Немалое значение могут иметь и личные взгляды эксперта, занимающегося подобными вопросами.

За полезной моделью закрепляется право на интеллектуальную собственность, как и для защиты изобретений, т. е. федеральные органы выдают патент на полезную модель. Процедура получения патента на полезную модель во многом такая же, как и при получении патента на изобретение. Однако она значительно проще, для нее требуется меньше материальных затрат и затрат времени. Составляется заявка, форма которой аналогична заявке на изобретение, т. е. в нее включается описание, формула полезной модели и т. д., и все это посылается в Роспатент. Однако обязательного проведения экспертизы на ее соответствие требованиям новизны и промышленной применимости в этом случае не требуется, и ответственность за полноту и достоверность представляемых материалов возлагается на заявителя. По этой причине продолжительность рассмотрения заявок на полезную модель меньше, чем на изобретение. Минимальная продолжительность – 1,5 месяца, а в среднем, как показывает практика, 6 месяцев. Рассмотрение же заявок на изобретение имеет минимальную продолжительность 8 месяцев, в среднем 3 года. Кроме того, пошлины за получение патента на полезную модель в несколько раз ниже, чем за получение патента на изобретение. Однако срок действия правовой защиты патента на полезную модель меньше, чем на изобретение: патент на полезную модель действует 10 лет (возможно продление до 13 лет), на изобретение – 20 лет.

Промышленный образец – это художественно-конструкторское решение изделия промышленного или кустарно-ремесленного производства, определяющее его внешний вид. Он тоже является объектом патентного права. Критерии промышленного образца и охрана прав на него зависят от законодательства конкретной страны. В России промышленному образцу предоставляется правовая охрана, если он является новым и оригинальным. Под новизной подразумевается новизна совокупности его существенных признаков. Оригинальность означает, что существенные признаки промышленного образца обусловлены творческим характером особенностей изделия.

В качестве промышленных образцов могут регистрироваться любые изделия – пищевые продукты, одежда, приборы и инструменты, посуда, бытовые принадлежности, печатная продукция, транспортные средства, протекторы шин, сувениры, игрушки, строительные материалы, малые архитектурные формы, такие как киоски и павильоны, интерьер, мебель, части изделий, внешний вид интернет-сайта (интерфейс) и многое другое. Тара и упаковка, этикетки и эмблемы также могут быть зарегистрированы в качестве промышленных образцов. Не охраняются решения, обусловленные исключительно технической функцией изделия, объекты архитектуры, промышленные и прочие стационарные сооружения, а также объекты неустойчивой формы (жидкие, газообразные, сыпучие и т. д.). Типичными примерами давно известных промышленных образцов могут служить стеклянные бутылки кока-колы, спрайта и т. д.

Процедура получения патента на промышленный образец во многом сходна с получением патента на изобретение или полезную модель. В Роспатент подается заявка, включающая заявление установленного образца, описание промышленного образца, перечень существенных признаков, комплект изображений изделия, дающих полное детальное представление о внешнем виде изделия, чертеж общего вида изделия и ряд других менее значительных материалов. Срок действия патента на промышленный образец – 15 лет (возможно продление до 25 лет).

Н о у - х а у (know how) – полезное творческое решение, не являющееся объектом патентного права вследствие низкого уровня его новизны и оригинальности. Оно отражает технические знания и производственный опыт, которые позволяют существенно повысить эффективность применения известных решений (в том числе и запатентованных), но не обладает новизной и оригинальностью, достаточной для признания его изобретением или полезной моделью. В основном это различные «технологические тонкости», связанные с выполнением отдельных операций: что-то перед использованием нужно смазать, что-то увлажнить, почистить, подогреть или охладить, какие-то болты нужно более крепко завинтить

или, напротив, ослабить, при приготовлении той или иной смеси какой-то компонент требуется положить раньше, какой-то позже и т. д. и т. п.

Чаше всего подобные действия необходимы не столько для того, чтобы нормально протекающий процесс шел еще лучше, сколько для предотвращения различных сбоев или обеспечения самой возможности протекания этого процесса.

История зарубежного технического шпионажа содержит много прецедентов, когда шпиону удавалось выкрасть у конкурента то или иное секретное изобретение без многочисленных ноу-хау, с ним связанных. В результате добытое таким способом изобретение часто освоить не удавалось.

Ноу-хау также защищается от несанкционированного использования, но не с помощью патентов, а путем его засекречивания и заключения специальных соглашений.

8.7. Система регистрации научных открытий

Открытие называется установление ранее неизвестного явления, закономерности или свойства, вносящее коренные изменения в уровень познания окружающего мира. Как правило, открытия решают чисто научные задачи. Они происходят обычно в сфере фундаментальных наук. В прикладных науках открытия крайне редки.

На всех исторических этапах, относящихся к периоду цивилизации, открытия считались наивысшими достижениями научной мысли. Их авторы получали широкую известность как выдающиеся ученые, высоко ценились последующими поколениями. Иногда открытия существенно опережали свое время и получали признание лишь после смерти их авторов. Имена таких авторов-первопроходцев в дальнейшем обычно тоже становились известными, тем не менее некоторые открытия все же оказывались забытыми и заново повторялись через десятилетия, а иногда даже столетия. В частности, ни одна научная догадка Леонардо да Винчи не полу-

чила признания современников и все было «переоткрыто» (заново открыто) в последующие столетия.

Вопрос об установлении авторства открытий всегда привлекал внимание исследователей. Известно немало примеров, когда приоритет в каком-либо открытии служил предметом длительных дискуссий (иногда безрезультатных, т. е. стороны оставались при своем мнении). Это связано с тем, что установление авторства далеко не всегда представляет простую задачу. Нередко исследователи, работающие независимо друг от друга в разных местах (и тем более странах), практически одновременно приходили к одинаковому результату, оказывающемуся открытием. Там, где открытие было понято раньше и получило широкое признание, автор оказывался в лучшем положении, чем его непонятый коллега.

История науки знает немало случаев и явного плагиата, причем не только со стороны малоавторитетных ученых. Нередко значимость обнаружения какого-либо нового явления или факта становится ясной лишь через многие годы, когда установление авторства превращается в задачу историков науки.

По всем этим причинам во многих странах уже многие годы предпринимаются попытки выработки четкой системы регистрации открытий. Согласно Конвенции, учреждающей Всемирную организацию интеллектуальной собственности, научные открытия рассматриваются как самостоятельный объект интеллектуальной собственности. Тем не менее законодательство большинства стран в настоящее время не содержит норм, посвященных открытиям. Иногда такие положения есть, но они довольно несовершенны.

Наибольший опыт правовой защиты научных открытий имеет наша страна. С 1947 по 1991 г. в СССР действовала система государственной регистрации научных открытий, с 1973 г. функционировал специальный правительственный орган – Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий (с 1987 г. – Государственный комитет по изобретениям и открытиям при Государственном комитете СССР по науке и технике). По согласованию с Академией наук СССР он регистрировал открытия в специальном государственном реестре и выдавал дипломы на открытие.

Однако в 1991 г. в связи с политическими и экономическими изменениями в стране возобладала прозападная точка зрения, и государственная регистрация открытий была отменена. Такое решение породило множество дискуссий, которые привели к возобновлению регистрации открытий, но уже не на государственном, а на общественном уровне. Эти вопросы взяла на себя Российская академия естественных наук (РАЕН), являющаяся общественной академией. При академии была создана Ассоциация авторов научных открытий, которая занялась регистрацией научных открытий и выдачей соответствующих дипломов. В дальнейшем Ассоциация была преобразована в две организации – Международную ассоциацию авторов научных открытий и Международную академию авторов научных открытий и изобретений, которые продолжили деятельность по регистрации открытий.

В СССР система регистрации открытий была аналогична регистрации изобретений, т. е. необходимо было составлять соответствующую заявку и посылать ее на экспертизу в упомянутый Госкомитет. Главной частью заявки также являлись описание открытия и формула открытия. Однако в отличие от регистрации изобретений, содержание которых не подлежало разглашению до официального принятия заявки и выдачи «приоритетной справки», содержание открытия должно было быть широко известным и признанным. Требовались публикации в академических изданиях, дискуссии о достоверности обнаруженных явлений или фактов, признание за рубежом и т. д.

Процедура регистрации открытий органами РАЕН осталась практически такой же, как в бывшем СССР. Так же составляется заявка, главной частью которой является описание с формулой открытия. Объем описания обычно 50–70 страниц машинописного текста, который должен содержать сведения о приоритете, доказательстве достоверности, область научного и практического значения, формулу открытия, библиографию.

9. ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРАКТИКУ

Обеспечение эффективного использования научно-технических достижений представляет исключительно важную и в то же время весьма сложную задачу. Руководитель производственного предприятия, рассматривая предложения ученых и изобретателей, сталкивается с двумя альтернативными проблемами (опасностями):

- неприятие полезных предложений влечет за собой технологическое отставание, утрату конкурентоспособности на рынке;
- принятие ошибочного предложения влечет за собой большие убытки.

Постоянное совершенствование выпускаемой продукции представляет обязательное условие успеха в рыночной конкуренции, а оно невозможно без внедрения новейших научных достижений и изобретений. Победителем становится тот, кто лучше других может заметить такие достижения и быстрее других их внедрить. Естественно, что истинную ценность выпускаемой продукции могут исказить многие факторы – реклама, имидж предприятия, многочисленные случайные факторы, однако в конечном счете (иногда с опозданием) наиболее востребованной становится продукция, соответствующая наивысшему научно-техническому уровню. Иными словами, производитель, слабо интересующийся инновациями, обречен на банкротство.

В то же время освоение достижений науки – всегда очень сложный и дорогостоящий процесс. Если внедренное новшество оказывается неэффективным, то убытки могут быть очень большими. Характерна в этом смысле французская поговорка: «Разорить предпринимателя могут три вещи: вино, женщины и изобретатели».

Сложность рассматриваемой проблемы заключается в том, что отличить полезное предложение от ошибочного иногда очень трудно. Предприниматель или руководитель производства должен

обладать широким кругозором, знанием и опытом, чтобы не делать грубых ошибок в этой сфере. Экспонат выставки технических достижений, производящий хорошее впечатление на специалистов-посетителей, разрекламированная технология на практике вполне могут оказаться неэффективными. В ряде случаев ошибка обнаруживается быстро, но иногда проходят годы, прежде чем становится ясно, что принятое направление технического развития выбрано неудачно.

Некоторые научно-технические предложения находят применение очень быстро, некоторые – через многие годы, а некоторые вообще остаются невостребованными. В мировой практике в среднем только каждое четвертое изобретение находит практическое применение, а три четверти остаются незамеченными. Проблема состоит в том, что заранее предвидеть, какое именно изобретение будет востребовано, а какое нет, удастся далеко не всегда.

Период от патентования до широкого применения составляет в среднем 7–10 лет. По этой причине анализ тенденций в изобретательской деятельности может служить одним из исходных положений для прогноза развития той или иной отрасли техники. Однако в таких прогнозах необходимо быть очень осторожным: не зная, как будут внедряться в практику рассматриваемые изобретения, нельзя быть уверенным, что они повлияют на развитие отрасли.

Крупные технические достижения имеют источник в фундаментальных исследованиях (физике, химии, биологии и т. д.), затем выдвинутая идея все более конкретизируется, и на последнем этапе решающий шаг обычно делает специалист прикладной области, иногда даже не научный работник, а представитель практической сферы деятельности: конструктор, проектировщик, технолог, агроном, врач и т. д.

Рассматривая технические достижения Нового и Новейшего времен, легко заметить, что промежуток времени от выдвижения научной идеи до ее технического воплощения постоянно сокращается. Это связано с общей тенденцией повышения внимания к прикладным исследованиям, возрастанием их объемов и эффективности. Если в Средние века упомянутый период исчислялся столетиями,

то в XIX–XX вв. он сократился до нескольких десятилетий или даже до нескольких лет. Со времени открытия Ньютоном третьего закона механики («действие равно противодействию» – 1687 г.) до создания первых реактивных самолетов прошло более двух столетий (нереализованные проекты реактивных самолетов – конец XIX в., 1939 г. – полеты первых реактивных самолетов). Для возникновения фотографии потребовалось 112 лет (1727 г. – открытие способности некоторых веществ темнеть под воздействием света, 1839 г. – изобретение первого примитивного фотоаппарата). Для появления телефона потребовалось 56 лет (1820 г. – первые успешные попытки превращения электрических сигналов в акустические; 1876 г. – изобретение телефона). Для появления радио потребовалось всего лишь 28 лет (1867 г. – открытие электромагнитных волн, 1895 г. – изобретение радио). Многие изобретения в дальнейшем неоднократно совершенствовались, причем продолжительность этапов такого совершенствования также сокращалась. Многоэтапным процессом было, например, создание электрических двигателей. В 1820 г. Х. К. Эрстедом было открыто действие электрического тока на магнитную стрелку, в 1831 г. появился первый электрический двигатель постоянного тока, в 1841 г. – двигатель (синхронный) переменного тока, в 1879 г. – асинхронный двигатель трехфазного тока.

В XX в. подобный процесс еще более усложнился и ускорился, возросли масштабы и значимость технических решений.

Идея использования ракет для космических полетов и создания искусственных спутников Земли была обоснована К. Э. Циолковским в 1903 г. В 1926 г. в США был осуществлен первый запуск ракеты массой 4,2 кг на жидком топливе, которая пролетела 56 м, а в 1933 г. в СССР произведен запуск ракеты ГИРД-09 массой 19 кг, пролетевшей 150 м. Далее освоение космоса пошло гигантскими темпами. В 1957 г. в СССР запущен первый искусственный спутник Земли массой 83,6 кг, в 1961 г. в СССР осуществлен первый запуск человека в космос. 1970-е гг. ознаменовались началом эксплуатации орбитальных станций: «Салют» – 1971 г., «Мир» – 1986 г., Международной космической станции (МКС) – 1998 г. Космическая

техника все более проникает в самые разнообразные сферы жизни. На ней основано современное телевидение, мобильная связь, спутниковая навигация и т. д.

В XX в. получили широкое практическое применение многие технические идеи, основанные на совершенно новых научных представлениях, которые вообще не могли бы быть поняты людьми предшествующих эпох. Примером может служить лазерная техника. Научная идея усиления электромагнитных колебаний при помощи вынужденного индуцированного излучения атомов и молекул была выдвинута А. Эйнштейном в 1916 г., а в 1927 г. она получила в трудах П. Дирака строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики. Суть явления состоит в том, что возбужденный атом способен излучить фотон под действием другого фотона определенной энергии без поглощения последнего. В 1940 г. В. А. Фабрикант (СССР) доказал, что, используя индуцированное излучение, можно добиться усиления света, а в 1952 г. группой советских и американских физиков независимо друг от друга разработан принцип квантового генератора. В 1958 г. был создан оптический квантовый генератор – лазер, а в 1962 г. – полупроводниковый лазер. В настоящее время лазерная техника проникла почти во все сферы человеческой деятельности, начиная от бытовых приборов и кончая космическими исследованиями. Без нее уже невозможно представить развитие современных технологий в большинстве отраслей народного хозяйства. Она стала одним из определяющих факторов развития компьютерной техники, контрольно-измерительных приборов, средств связи, медицинского оборудования и др. На нее опираются быстро развивающиеся в настоящее время нанотехнологии.

В целом к концу XX в., как уже отмечалось, в развитых странах сложились условия, при которых эффективность использования научных достижений стала фактором, определяющим успех развития любого производства. Несмотря на это, вопросы своевременного выявления и внедрения в практику достижений науки и изобретений решались и решаются с большим трудом. На протяжении XIX–XX вв. трудности внедрения в той или иной форме

испытывали на себе практически все изобретатели и ученые, включая тех, кого последующие поколения относили к выдающимся. Характерно в этом отношении высказывание одного из таких выдающихся людей – создателя двигателя внутреннего сгорания (дизеля) Рудольфа Дизеля: «Внедрение – это время борьбы против тупости и зависти, безразличия и злобы, тайных и открытых противников, страшное время борьбы, всегда мучительное даже при достижении успеха». Читая такие слова, трудно поверить, что они принадлежат одному из наиболее удачливых (с точки зрения внедрения) изобретателей XIX–XX вв. Примеров, подтверждающих такую ситуацию, можно привести очень много. В нищете, непризнанным умер изобретатель телефона А. Меуччи (Италия), непризнанным, лишенным материальной поддержки ушел из жизни изобретатель самолета А. Ф. Можайский (Россия), большие сложности испытывал изобретатель парохода Р. Фултон (США) и т. д. Изобретатель телевизора (электронно-лучевой трубки) В. К. Зворыкин (русский эмигрант в США) послал заявку на патентование своего изобретения 1923 г., но получил патент только через 15 лет (1938 г.), так как убеждение американских экспертов в полезности предлагаемого решения оказалось очень сложным и затяжным делом.

Не меньшие трудности возникают и при оценке результатов в фундаментальных исследованиях. Многие выдающиеся достижения были поняты лишь через десятки лет после их публикации. Теория групп Э. Галуа получила признание только через полвека после смерти автора. Не дожидаясь признания своей неевклидовой геометрии Н. И. Лобачевский, не был принят в Российскую академию наук Д. И. Менделеев из-за «недостаточной ценности» работ и др. Макс Планк в полусутоливой форме так представил восприятие новых научных идей: «Новая научная истина прокладывает дорогу к триумфу не посредством убеждения оппонентов и принуждения их видеть мир в новом свете, а скорее потому, что оппоненты рано или поздно вымирают, и вырастает новое поколение, которое привыкло к этой истине».

Причины такого неприятия новых идей изучались многими науковедами, социологами и психологами. Согласно Т. Куну, нега-

тивное отношение научной общественности к принципиально новым идеям обусловлено не «тупостью и завистью», как полагал Р. Дизель, а является особенностью развития человеческого познания. Пополнение сведений об окружающем мире идет не путем беспристрастного восприятия и систематизации новых научных данных, а путем их отбора с позиции принятой на данном этапе развития догматизированной системы представлений – парадигмы. Это обычно не осознается критиками новых идей, но проявляется практически во всех случаях. Большинство участников научного сообщества рассматривают все, что не соответствует принятой парадигме, как ошибочное (до тех пор, пока принятая парадигма не будет заменена новой). В значительной мере это относится и к техническим представлениям: на каждом этапе что-то считается невозможным, что-то возможным, что-то понимается определенным образом и не допускает других объяснений и т. д. Новатор-исследователь или новатор-изобретатель, покушающийся на такие догматизированные представления, неизбежно навлекает на себя поток возражений, недоверия, а иногда и открытого возмущения. Такому новатору всегда будет требоваться много мужества, стойкости и веры в свою правоту, чтобы в конечном счете получить одобрение.

Сложной является взаимосвязь эффективности восприятия и внедрения научно-технических новшеств с формами хозяйствования. Рыночная экономика достаточно эффективна при внедрении достижений, потребителями которых являются отдельные лица или предприятия. Однако когда потребителем является общество в целом, успех может обеспечить только вмешательство государства.

Охрана природы принадлежит именно к таким «неудобным» для рыночной экономики проблемам.

В целом обеспечение эффективности системы отбора и внедрения предложений исследователей и изобретателей пока остается проблемой, в которой еще много нерешенных вопросов. Существенное значение при этом продолжают играть многие субъективные факторы. Уровень мастерства руководителя производства

(или эффективность его аппарата) в оценке перспективности предложений исследователей и изобретателей пока имеет определяющее значение.

Практика показывает, что успешному внедрению научно-технических достижений способствуют следующие условия.

Во-первых, это эффективные методы распространения и освоения научно-технической информации – участие в научно-практических семинарах, конференциях, выставках, публикации в наиболее известных журналах, использование Интернета и т. д. Иными словами, разработчик должен постоянно заниматься пропагандой своих инновационных идей, а руководитель производства должен как можно больше знать о предлагаемых инновациях, с тем чтобы иметь возможность выбирать наиболее подходящие. Без этого любое новое решение останется на бумаге, т. е. пословица «Под лежащий камень вода не течет» в данном случае вполне отражает ситуацию.

Во-вторых, необходимы как можно более тесные контакты между разработчиком инновации и ее потребителями, что должно обеспечивать взаимную осведомленность и доверие. Во многих случаях оптимальной является ситуация, когда разработчик и изготовитель предлагаемой продукции совмещаются в одной организации. Такие специализированные предприятия могут быть очень эффективными, но организация их деятельности представляет сложный вопрос, решение которого зависит от местных условий и компетентности персонала.

В-третьих, необходима пропаганда современных взглядов на роль науки в экономической жизни общества, на производственный риск, связанный с внедрением ее достижений. Если в обществе будет превалировать взгляд на науку как на интеллектуальное развлечение и пустую трату денег, а риск предпринимателя, вкладывающего денежные средства в новые научные предложения, не будет вызывать уважения и общественной поддержки, то на прогрессивное развитие рассчитывать не следует. Это путь к застою и деградации. С этим связана также необходимость приспособления законодательства к требованиям технического прогресса. Если

все действия производителя жестко регламентируются государственными нормами, являющимися для него обязательными, применение любого новшества становится невозможным, ибо оно автоматически нарушает эти нормы. Как показала практика, все попытки «своевременно корректировать нормы в соответствии с научными достижениями» оказываются малоэффективными. По этой причине в первом десятилетии XXI в. в России начался глобальный процесс отказа от обязательных нормативных документов, для чего были приняты специальные законы: Закон о техническом регулировании, Закон о техническом регламенте «О безопасности зданий и сооружений» и др., объявляющие все нормы и стандарты добровольными (рекомендательными). Естественно, что такая перестройка – очень сложный процесс, требующий больших усилий, но большинство специалистов в сфере технической политики считают, что другого пути превращения науки в двигатель производства нет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976.
2. Азимов А. Путеводитель по науке. От египетских пирамид до космических станций : пер. с англ. М. : ЗАО «Центрполиграф», 2006.
3. Альтишуллер Г. С. Найти идею: введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. М. : Альпина Бизнес Букс, 2007.
4. Беняковский М. А., Бровман М. Я. Применение тензометрии в прокатке. М. : Металлургиздат, 1965.
5. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М. : Наука, 1980.
6. Глазовский Б. А., Бивен И. Д. Электротензометры сопротивления. Л. : Энергия, 1972.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш. школа, 2003.
8. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л. : Энергоатомиздат, 1990.
9. Датчики измерительных систем : в 2 кн. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др. ; под ред. А. С. Обухова. М. : Мир, 1992.
10. Исследования и изобретательство в машиностроении : учебник для студентов машиностр. специальностей вузов / М. Ф. Пашкевич, А. А. Жолобов, Ж. А. Мрочек и др. Минск : Адукацыя і выхаванне, 2005.
11. История инженерной деятельности : курс лекций для студентов всех специальностей дневного и заочного обучения / В. В. Морозов, В. И. Николаенко. Харьков : НТУ «ХПИ», 2007.
12. Карпухина С. И. Защита интеллектуальной собственности и патентоведение. М. : Междунар. отношения, 2004.
13. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов по специальности «Обработка металлов давлением». М. : Металлургия, 1986.
14. Меерович И. М., Филатов А. С. Измерение усилий при прокатке. М. : Металлургиздат, 1963.
15. Основы научных исследований : учебник для техн. вузов / под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. М. : Высш. школа, 1989.

16. Пригоровский Н. И. Экспериментальные методы исследования напряжений. М. : Машиностроение, 1970.

17. Раскатов Е. Ю. Моделирование пилигримовой прокатки бесшовных труб. LAP : LAMBERT Academic Publishing, 2011.

18. Раскатов Е. Ю., Лехов О. С. Горячая пилигримовая прокатка труб. Теория и расчет : монография. Екатеринбург : УрФУ, 2011.

19. Рогов В. А., Позняк Г. Г. Методика и практика технических экспериментов : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений. М. : Изд. центр «Академия», 2005.

20. Рыжков И. Б. Основы научных исследований и изобретательства : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2012.

21. Сафьянов А. В., Раскатов Е. Ю. Методы расчета калибровок валков для прокатки тонкостенных и толстостенных труб на пилигримовых станах. Екатеринбург : УрФУ, 2011.

22. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М. : Машиностроение, 1981.

23. Тензометрия в машиностроении : справ. пособие / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский и др. М. : Машиностроение, 1975.

24. Теория подобия и размерностей: моделирование / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич и др. М. : Высш. школа, 1968.

25. Чижиков Ю. М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. М. : Металлургия, 1970.

26. Экспериментальная механика : в 2 кн. / под ред. А. Кобаяси. М. : Мир, 1990.

27. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. Киев : Наук. думка, 1981.

28. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др. М. : Энергия, 1975.

Учебное издание

Раскатов Евгений Юрьевич
Спиридонов Владимир Александрович

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

Учебное пособие

Заведующий редакцией *М. А. Овечкина*
Редактор *С. Г. Галинова*
Корректор *С. Г. Галинова*
Компьютерная верстка *Г. Б. Головиной*

План изданий 2015 г. Подписано в печать 30.10.2015.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 24,8. Усл. печ. л. 27,2. Тираж 200 экз. Заказ 316.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: + (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс +7 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru



Раскатов Евгений Юрьевич

Доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургических и роторных машин Уральского федерального университета. Окончил механико-машиностроительный факультет Уральского государственного технического университета (1996). Более десяти лет ведет курсы «Металлургические машины и оборудование», «Методы исследования машин». Сфера научных интересов связана с математическим моделированием технологий и машин для производства горячекатаных труб.



Спиридонов Владимир Александрович

Кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических и роторных машин Уральского федерального университета. Окончил механический факультет Уральского политехнического института (1982). Более пятнадцати лет вел курс «Методы исследования машин». Сфера научных интересов связана с математическим моделированием процессов производства холоднодеформированных труб.